

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Student:
Stjepan Štavalj

Zagreb, 2017.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Zoran Kožuh

Student:

Stjepan Štavalj

Zagreb, 2017.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se mentoru Prof. dr. sc. Zoranu Kožuhu na stručnim savjetima i pomoći tijekom izrade ovog rada. Posebno se zahvaljujem asistentici dr. sc. Maji Jurici na velikoj pomoći tijekom izrade završnog rada. Također se zahvaljujem tehničkom osoblju Laboratorija za zavarene konstrukcije jer su mi omogućili izvođenje eksperimentalnog rada.

Stjepan Štavalj



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomске ispite
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **STJEPAN ŠTAVALJ**

Mat. br.: 0035194009

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **STABILNOST PROCESA MAG ZAVARIVANJA S TROKOMPONENTNIM PLINSKIM MJEŠAVINAMA**

Naslov rada na engleskom jeziku: **PROCESS STABILITY OF MAG WELDING WITH THREE COMPONENT GAS MIXTURES**

Opis zadatka:

Opisati postupak MAG zavarivanja s posebnim naglaskom na način prijenosa metala u električnom luku. Analizirati CBT-Control Bridge Transfer prijenos metala u električnom luku i navesti osnovne prednosti i primjenu. Dati pregled zaštitnih plinova koji se koriste pri MAG zavarivanju i posebno obraditi trokomponentne mješavine argona, ugljičnog dioksida i kisika.

U eksperimentalnom dijelu potrebno je osmisliti plan pokusa kako bi se mogle usporediti karakteristike električnog luka u konvencionalnom i CBT prijenosu uz primjenu trokomponentnih plinskih mješavina sastava 90% Ar, 5% O₂ i 5% CO₂ te 93% Ar, 1% O₂ i 6% CO₂ na više razina unosa topline. Analizirati dobivene rezultate i posebno komentirati područje prijelaznog luka. Također navesti područje moguće primjene korištenih trokomponentnih mješavina i njihovu pogodnost za korištenje pri CBT prijenosu metala.

Zadatak zadan:

30. studenog 2016.

Zadatak zadao:

Prof.dr.sc. Zoran Kožuh

Rok predaje rada:

1. rok: 24. veljače 2017.

2. rok (izvanredni): 28. lipnja 2017.

3. rok: 22. rujna 2017.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 27.2. - 03.03. 2017.

2. rok (izvanredni): 30. 06. 2017.

3. rok: 25.9. - 29. 09. 2017.

v.d. predsjednika Povjerenstva:

Izv. prof. dr. sc. Branko Bauer

SADRŽAJ:

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	V
POPIS OZNAKA	VI
POPIS KRATICA	VII
SAŽETAK.....	VIII
SUMMARY	IX
1. UVOD	1
2. MAG ZAVARIVANJE.....	2
2.1. PARAMETRI ZAVARIVANJA	3
2.2. PREDNOSTI I NEDOSTATCI MAG ZAVARIVANJA.....	6
2.3. ELEKTRIČNI LUK KAO IZVOR ENERGIJE ZA ZAVARIVANJE	7
2.4. UTJECAJ SILA NA PRIJENOS METALA U ELEKTRIČNOM LUKU.....	9
2.5. NAČINI PRIJENOSA DODATNOG MATERIJALA U ELEKTRIČNOM LUKU	13
2.5.1. PRIJENOS METALA KRATKIM SPOJEVIMA.....	13
2.5.2. PRIJENOS METALA ŠTRCAJUĆIM LUKOM.....	15
2.5.3. PRIJENOS METALA MJEŠOVITIM LUKOM	16
2.5.4. PRIJENOS METALA IMPULSNIM STRUJAMA.....	17
3. CBT CONTROLLED BRIDGE TRANSFER	19
3.1. OPIS POSTUPKA MAG – CBT	19
3.2. CBT – EX proces	22
3.3. EN – CBT proces	24

3.4. AC – CBT proces.....	25
4. ULOGA ZAŠTITNIH PLINOVA PRI ZAVARIVANJU	26
4.1. ZAŠTITNI PLINOVI KOJI SE KORISTE PRI MAG ZAVARIVANJU.....	27
4.2. PLINSKE MJEŠAVINE	30
4.2.1. TROKOMPONENTNE PLINSKE MJEŠAVINE	32
5. EKSPERIMENTALNI DIO RADA	33
5.1. UVOD	33
5.2. IZVOR STRUJE ZA ZAVARIVANJE	35
5.3. DODATNI MATERIJAL	37
5.4. ZAŠTITNE PLINSKE MJEŠAVINE.....	38
5.5. AUTOMAT ZA VOĐENJE PIŠTOLJA	39
5.6. PROCESI NAVARIVANJA	40
5.6.1. NAVARIVANJE U ZAŠTITI PLINA Ferroline C6 X1	41
5.6.2. NAVARIVANJE U ZAŠTITI PLINA Ferroline C5 X5	45
5.7. ANALIZA REZULTATA	49
6. ZAKLJUČAK	51
POPIS LITERATURE	52

POPIS SLIKA:

Slika 1. Shema postupka MIG/MAG zavarivanja.....	2
Slika 2. Radna točka zavarivanja	4
Slika 3. Utjecaj sile gravitacije na prijenos dodatnog materijala	10
Slika 4. Interakcija sila i djelovanje „pinch“ efekta u električnom luku.....	12
Slika 5. MIG/MAG prijenos metala kratkim spojevima	13
Slika 6. Prijenos metala štrcajućim lukom kod MIG/MAG zavarivanja	16
Slika 7. Prijenos metala mješovitim lukom.....	16
Slika 8. Promjena struje u ovisnosti o vremenu pri impulsnom zavarivanju	18
Slika 9. Princip CBT MIG/MAG postupka zavarivanja	19
Slika 10. Predviđanje trenutka ponovne uspostave električnog luka	20
Slika 11. Prijenos rastaljenog metala pri MAG CBT i dijagram napona i struje u ovisnosti o vremenu	21
Slika 12. Opći valni oblik struje pri MAG zavarivanju	22
Slika 13. Valni oblik struje pri zavarivanju u 100% CO ₂ zaštiti.....	22
Slika 14. Usporedba brzine taljenja žice pri zavarivanju na pozitivnom i negativnom polu	24
Slika 15. Utjecaj plinova na geometriju zavora.....	28
Slika 16. Toplinska vodljivost pojedinog zaštitnog plina u ovisnosti o temperaturi	29
Slika 17. Izvor struje za zavarivanje WB - P500L [15]	35
Slika 18. Operatorsko sučelje uređaja za zavarivanje WB – 500L	36
Slika 19. Dodatni materijal korišten pri izradi eksperimenta.....	37
Slika 20. a) Uređaj za vođenje pištolja „BUG – O MDS 1002“	39
Slika 20. b) Uređaj za vođenje pištolja „BUG – O MDS 1002“	39
Slika 21. Usporedni prikaz električnog luka pri navarivanju u zaštiti Ferroline C6 X1 i jakosti struje zavarivanja 150 A.....	42

Slika 22. Izgled navara, konvencionalno i CBT (150 A, Ferrolina C6 X1).....	42
Slika 23. Usporedni prikaz električnog luka pri navarivanju u zaštiti Ferrolina C6 X1 i jakosti struje zavarivanja 175 A.....	43
Slika 24. Izgled navara, konvencionalno i CBT (175 A, Ferrolina C6 X1).....	43
Slika 25. Usporedni prikaz električnog luka pri navarivanju u zaštiti Ferrolina C6 X1 i jakosti struje zavarivanja 200 A.....	44
Slika 26. Izgled navara, konvencionalno i CBT (200 A, Ferrolina C6 X1).....	44
Slika 27. Usporedni prikaz električnog luka pri navarivanju u zaštiti Ferrolina C5 X5 i jakosti struje zavarivanja 150 A.....	46
Slika 28. Izgled navara, konvencionalno i CBT (150 A, Ferrolina C5 X5).....	46
Slika 29. Usporedni prikaz električnog luka pri navarivanju u zaštiti Ferrolina C5 X5 i jakosti struje zavarivanja 175 A.....	47
Slika 30. Izgled navara, konvencionalno i CBT (175 A, Ferrolina C5 X5).....	47
Slika 31. Usporedni prikaz električnog luka pri navarivanju u zaštiti Ferrolina C5 X5 i jakosti struje zavarivanja 200 A.....	48
Slika 32. Izgled navara, konvencionalno i CBT (200 A, Ferrolina C5 X5).....	48

POPIS TABLICA:

Tablica 1. Ionizacijski potencijal zaštitnih plinova	29
Tablica 2. Tablica trokomponentnih zaštitnih plinskih mješavina Ar - O ₂ - CO ₂	33
Tablica 3. Korišteni zaštitni plinovi	37
Tablica 4. Parametri zavarivanja pri navarivanju u zaštiti plinske mješavine Ferrolina C6 X1 ..	41
Tablica 5. Parametri zavarivanja pri navarivanju u zaštiti plinske mješavine Ferrolina C5 X5 ..	45

POPIS OZNAKA:

Oznaka	Jedinica	Opis
I	A	Jakost struje zavarivanja
G	N	Sila gravitacije
F_{emr}	N	Radijalna komponenta elektromagnetske sile
P	N/m ²	Tlak plina
U	V	Napon
Q	kJ/mm	Unešena toplina
l	mm	Dužina slobodnog kraja žice
t	s	Vrijeme
v	mm/s	Brzina zavarivanja
V	m ³	Volumen
m	kg	Masa
I_{kr}	A	Kritična jakost struje zavarivanja

POPIS KRATICA:

Kratika	Opis
MAG	Metal active gas
MIG	Metal inert gas
CBT	Controlled bridge transfer
MAG CBT	Metal active gas
MAGM	Metal active gas mixture
CBT – EX	Controlled bridge transfer – expanded
EN – CBT	Electrode negative – controlled bridge transfer
AC – CBT	Alternating current – controlled bridge transfer
AC – MAG	Alternating current – metal active gas

SAŽETAK

U teorijskom dijelu ovog završnog rada opisan je MAG postupak elektrolučnog zavarivanja s posebnim naglaskom na načine prijenosa metala u električnom luku, zatim je opisan CBT – Controlled bridge transfer, modificirani način prijenosa metala u električnom luku, prednosti i primjena. Zadnji dio teorijskog dijela rada odnosi se na zaštitne plinove i trokomponentne plinske mješavine argona, ugljičnog dioksida i kisika koje se koriste pri MAG zavarivanju. Opisane su karakteristike i utjecaj plinova na ponašanje električnog luka i svojstva zavara.

U eksperimentalnom dijelu ovog rada opisana je oprema pomoću koje je proveden eksperiment, dodatni materijal i zaštitne plinske mješavine korištene u eksperimentu. U eksperimentu su uspoređene karakteristike električnog luka u konvencionalnom i CBT prijenosu metala u zaštiti trokomponentnih plinskih mješavina sastava 90% Ar, 5% O₂ i 5% CO₂ te 93% Ar, 1% O₂ i 6% CO₂ na više razina unosa topline. Dobiveni su rezultati analizirani, uz poseban osvrt na pogodnost zadanih plinskih mješavina za korištenje pri CBT prijenosu metala.

Ključne riječi: MAG zavarivanje, CBT, trokomponentne plinske mješavine

SUMMARY

In the theoretical part of this paper MAG welding process is presented with the special emphasis on the metal transfer in the arc. Also, CBT is described – Controlled Bridge transfer, a modified method of metal transmission in an electric arc; advantages and application. Last paragraph of the theoretical part refers to shielding gasses and three-component gas mixtures of Argon, Carbon Dioxide and Oxygen used in MAG welding. Properties of gases are described as well as their impact on the electric arc behavior and weld properties.

Equipment, additional materials and shielding gases mixtures are described in the experimental part of this paper. In the experiment arc properties in the conventional and CBT metal transfer were compared using three – component gas mixtures with the composition of 90% Ar, 5% O₂ and 5% CO₂, also 93% Ar, 1% O₂ and 6% CO₂ on different heat input levels. Obtained results were analyzed, especially referring to suitability of used gas mixtures for CBT metal transfer.

Key words: MAG welding, CBT, three-component gas mixture

1. UVOD

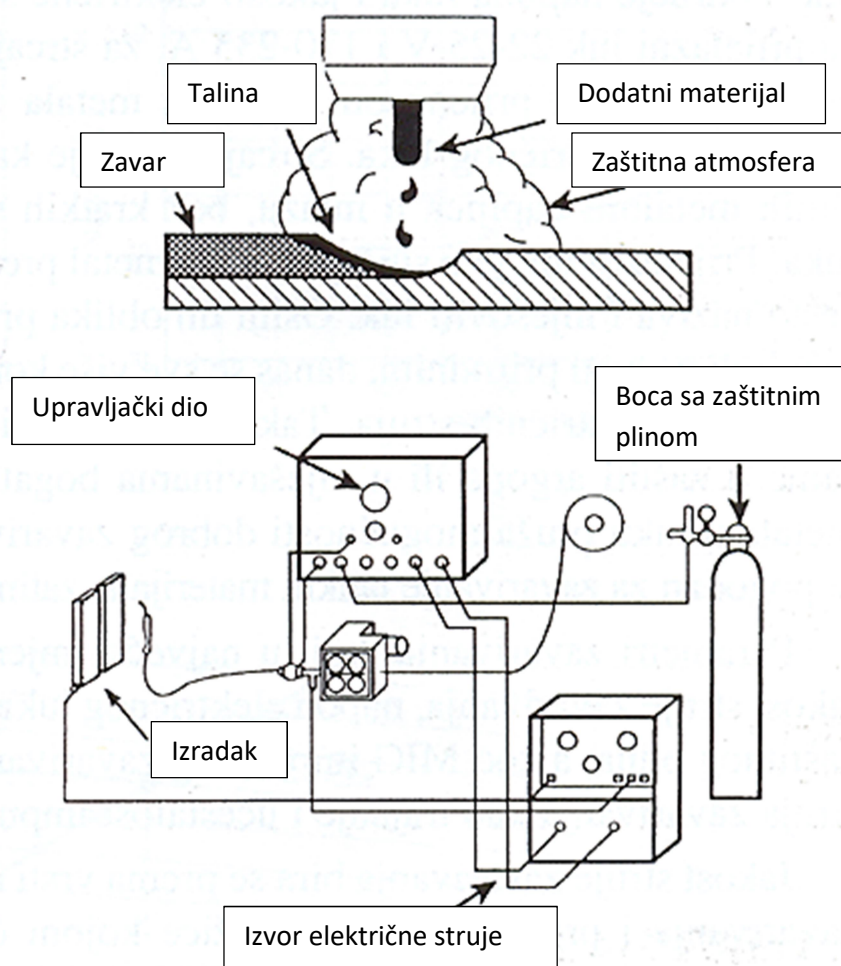
Elektrolučno zavarivanje u zaštitnoj atmosferi plina s taljivom elektrodom postupcima MIG/MAG može biti poluautomatizirano i automatizirano. Najviše se primjenjuje poluautomatizirani postupak pod nazivom „CO₂“ (MAG) postupak zavarivanja. Poluautomatizirani postupak ima sljedeće prednosti u odnosu na ručno zavarivanje obloženom elektrodom: može se uspješno primjenjivati u svim položajima, na kratkim zavarima i na teško pristupačnim mjestima. Postiže se znatno smanjenje vremena rada (oko 50%). Osim smanjenja vremena rada postižu se znatne uštede na dodatnom materijalu (manji gubitci, uži žljeb, veća penetracija). Bolji su uvjeti rada za zavarivača. Bolji je pregled nad talinom u toku zavarivanja, potrebno je manje vremena za obučavanje zavarivača. Zavarivanje kratkim spojevima omogućava zavarivanje vrlo tankih limova i manje deformacije. [1,2]

CBT postupak zavarivanja kombinira karakteristike kratkog luka i impulsnog luka u svrhu dobivanja niskog unosa topline, i minimalne količine štrcanja. Ovakvo zavarivanje omogućuje izvor struje za zavarivanje koji ima mogućnost produciranja preciznog valnog oblika struje u točno određenim vremenskim intervalima koje određuje prema iznosu napona električnog luka. MAG CBT postupak zavarivanja također smanjuje utjecaj zavarivača na parametre zavarivanja. Glavnu je primjenu pronašao u automobilskoj industriji za zavarivanje tankih limova. [2]

Kod klasičnog MAG zavarivanja kao zaštitni plin koristi se CO₂ ili mješavina plinova (MAGM zavarivanje). Mješavine plinova se koriste sa svrhom da se poboljša način prijenosa metala i svojstva zavarenih spojeva. Primjena MAGM impulsnog zavarivanja za zavarivanje svih vrsta čelika ima niz prednosti pred klasičnim MAG zavarivanjem. Izborom sastava zaštitne plinske mješavine, moguće je u potrebnom omjeru kombinirati svojstva pojedinih sastavnih plinskih komponenti tako da rezultirajuća mješavina ima optimalna svojstva za zadane uvjete zavarivanja. [3]

2. MAG ZAVARIVANJE

Elektrolučno zavarivanje taljivom elektrodom pod zaštitom inertnog (MIG) ili aktivnog (MAG) plina naziva se MIG/MAG zavarivanje. Elektrolučno zavarivanje pod zaštitom plina taljivom elektrodom je visokoučinski postupak zavarivanja, kod kojeg je električni luk uspostavljen između metalne elektrode, koja se tali, i osnovnog materijala (slika 1). Žica se automatski odmatava s koluta, ovisno o jakosti struje i dovodi na mjesto zavarivanja. Princip postupka i uređaji za MIG i MAG zavarivanje su jednaki. Razlika je u vrsti zaštitnog plina, dodatnom materijalu i području primjene. Ako se kao zaštitni plin koristi ugljični dioksid (CO_2) ili mješavine plinova argon + ugljični dioksid ($\text{Ar} + \text{CO}_2$), argon + ugljični dioksid + kisik ($\text{Ar} + \text{CO}_2 + \text{O}_2$), to je postupak MAG (metal active gas) i primjenjuje se za zavarivanje nelegiranih i niskolegiranih čelika. [4]



Slika 1. Shema postupka MIG/MAG zavarivanja [5]

2.1. PARAMETRI ZAVARIVANJA

Miran i stabilan električni luk postiže se samo pravilnim izborom parametara zavarivanja koji, kao i kod ostalih postupaka zavarivanja, uz izbor dodatnog materijala, određuju kvalitetu zavarenog spoja. To su: [4]

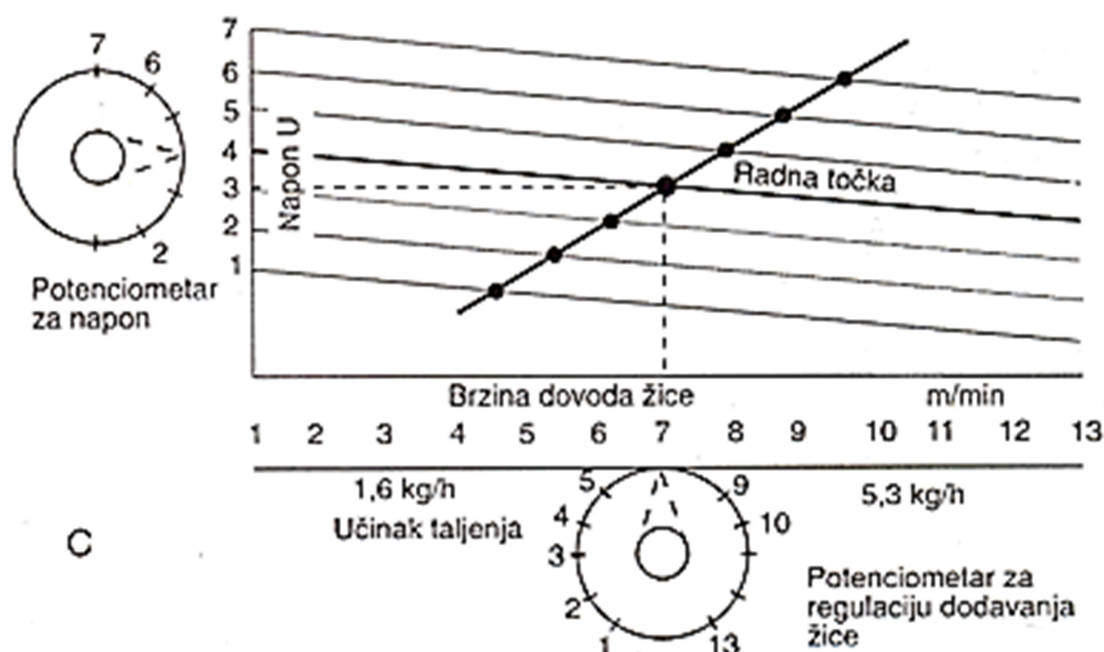
- Jakost struje zavarivanja
- Promjer žice
- Napon zavarivanja
- Brzina zavarivanja
- Duljina slobodnog kraja žice
- Protok zaštitnog plina
- Polaritet elektrode
- Nagib pištolja

Jakost struje zavarivanja ovisi o debljini materijala koji se zavaruje i položaju zavarivanja. Podešavanje jakosti struje vrši se prema odabranoj brzini dovođenja žice. Što je veća brzina dovođenja žice, bit će veća i jakost struje zavarivanja. Povećanjem jakosti struje zavarivanja povećava se penetracija i učinak taljenja. Prekomjerno povećavanje jakosti struje dovodi do većeg prskanja materijala za vrijeme zavarivanja. [4]

Promjer žice odabire se na temelju debljine osnovnog materijala i položaja zavarivanja. Veći promjeri žice zahtijevaju veću jakost struje i daju veći učinak taljenja. Za određene promjere žica mogu se koristiti različite jakosti struje zavarivanja. Za jednu određenu jakost struje postiže se veći učinak taljenja ako se upotrijebi žica manjeg promjera. [4]

Napon električnog luka, uz jakost struje, najviše utječe na kvalitetu zavarenog spoja. Uz odabranu jakost struje i žicu određena promjera može se zavarivati sa različitim vrijednostima napona. Povećanjem napona smanjuje se penetracija i nadvišenje, a povećava se širina zavora. Napon luka direktno ovisi o duljini luka. Što je veća duljina električnog luka, veći je i napon zavarivanja. Prekomjernim povećanjem napona smanjuje se zaštita rastaljenog metala i pogoršavaju mehanička svojstva zavarenog spoja. Sa stajališta mehaničkih svojstava za određenu jakost struje treba održavati niži napon. Uz jednaku jakost struje, za manje promjere žice koriste se veći naponi luka [4]. Smanjenjem napona povećava se penetracija, a smanjuje širina zavora. U principu zavarivanje treba izvoditi sa što manjim naponom luka, ali koji odgovara ostalim parametrima zavarivanja. [1]

Napon električnog luka i struja zavarivanja određuju radnu točku izvora struje zavarivanja, što prikazuje slika 2.



Slika 2. Radna točka zavarivanja [5]

Brzina zavarivanja ovisi o položaju zavarivanja i odabranoj jakosti struje. Povećanjem brzine zavarivanja smanjuje se dubina penetracije, širina i nadvišenje zavora. Povećanjem brzine zavarivanja dolazi do slabljenja zaštite taline, mijenja se kemijski sastav zavora, što nepovoljno utječe na mehanička svojstva zavarenog spoja. Preveliko smanjenje brzine zavarivanja, također nije dobro jer smanjuje penetraciju, dobiva se preširok zavor (talina se podvlači pod el. luk), stvara se velika količina pregrijane taline i smanjuje se ekonomičnost postupka. [1]

Pod slobodnim krajem žice razumijeva se dio žice od izlaza iz kontaktne vodilice do početka električnog luka. Duljina slobodnog kraja žice iznosi 13 puta promjer žice. Povećanjem duljine slobodnog kraja žice povećava se električni otpor i žica se jače zagrijava. Tako se uz određenu jakost struje može povećati koeficijent taljenja ako se poveća slobodni kraj žice. U pravilu se nastoji da dužina slobodnog kraja žice bude što manja, kako bi luk bio što kraći. Kod suviše male dužine slobodnog kraja žice dolazi do onečišćenja sapnice i kontaktne vodilice, a može doći i do taljenja žice u samoj vodilici. [4]

Potrošnja plina najviše zavisi od mjesta i uvjeta rada. Zavarivanje na otvorenom prostoru gotovo udvostručuje potrošnju plina u odnosu na potrošnju plina pri zavarivanju u halama. Zavarivanje na jakom vjetru je nemoguće, jer zbog neadekvatne zaštite dolazi do pojave poroziteta u zavaru. S povećanjem potrošnje plina smanjuje se koeficijent taljenja žice. Povećana potrošnja plina dovodi do povećanog štrcanja i izaziva poroznost u zavaru. Smanjena potrošnja također smanjuje zaštitu taline i time utječe na kvalitetu zavarenog spoja. Saprnice malog promjera su neekonomične i brzo se onečiste. Osnovni princip je tražiti optimalnu potrošnju zaštitnog plina, tj. da je minimalna, ali dovoljna da zaštiti talinu. [1]

Polaritet elektrode utječe na penetraciju, koeficijent taljenja i stabilnost električnog luka. Najčešće se elektroda priključuje na plus (+) pol. Ako je elektroda priključena na minus (-) pol, povećava se koeficijent taljenja, a smanjuje penetracija i stabilnost električnog luka. [4]

Nagib pištolja u smjeru ili suprotno od smjera zavarivanja utječe na oblik zavora i penetraciju. Pri sučeljenom zavarivanju pištolj se drži pod nagibom 15° od vertikalne osi, a pri kutnom 30 do 45° od vertikalne osi. Takav nagib pištolja omogućuje dobru kontrolu i pregled taline. Prevelik nagib pištolja uzrokuje manji provar i veće prskanje [4]. Vođenje pištolja s desna u lijevo ili prema naprijed rezultira manjom dubinom penetracije, širim zavarom, ljepši je izgled površine zavora, bolji pregled nad mjestom zavarivanja i sklonost poroznosti je veća. Vođenje pištolja s lijeva na desno ili prema natrag: rezultira većom dubinom penetracije, zavar je uskog i ispupčenog oblika, površina zavora je jako „narebrena“, sklonost poroznosti je manja i slabiji je pregled nad mjestom zavarivanja. [1]

2.2. PREDNOSTI I NEDOSTATCI MAG ZAVARIVANJA

MAG postupak zavarivanja zadržava mnoge prednosti ispred ostalih postupaka zavarivanja, ali i nekoliko nedostataka.

Prednosti postupka MAG zavarivanja: [5]

- primjenjiv za zavarivanje svih vrsta materijala,
- velika mogućnost izbora parametara i načina prijenosa metala,
- mogućnost zavarivanja u svim položajima,
- zavarivanje u radionici i na terenu,
- mogućnost primjene različitih plinskih mješavina,
- mogućnost primjene praškom punjene žice,
- široki raspon debljina osnovnih materijala,
- velika učinkovitost i proizvodnost,
- pogodan za automatizaciju,
- moguća primjena i za lemljenje.

Nedostatci procesa MAG zavarivanja: [5]

- kod rada na terenu moguće greške zbog loše zaštite (vjetar otpuhuje zaštitni plin),
- veći broj grešaka uslijed neodgovarajuće tehnike rada i parametara zavarivanja (naljepljivanje, poroznost, štrcanje),
- štrcanje kod zavarivanja kratkim spojevima (gubitci dodatnog materijala i potreba za naknadnim čišćenjem),
- složeniji uređaji (dovođenje žice, automatska regulacija).

Najčešće pogreške kod MAG zavarivanja: [1]

- porozitet se javlja uslijed loše tehnike rada, prisustva nečistoća, zbog neodgovarajućeg protoka plina, loše kvalitete plina,
- naljepljivanje je posljedica loše tehnike rada, ili pogrešno odabranih parametara,
- štrcanje nastaje uslijed zavarivanja neadekvatnim parametrima, a posljedica štrcanja je potreba za dodatnim čišćenjem, gubitak dodatnog materijala, korozijski produkti...

2.3. ELEKTRIČNI LUK KAO IZVOR ENERGIJE ZA ZAVARIVANJE

Električni luk je trajno pražnjenje elektriciteta u plinovima, među ugljenim (grafitnim) ili metalnim elektrodama, uz visoke temperature, visoku gustoću struje, s jakom termoelektronskom i fotoelektronskom emisijom. Električni luk je najčešće korišteni izvor topline u zavarivanju. Naziv luk došao je iz vremena prve primjene električnog luka za svjetleći stup između dvije horizontalne elektrode, kada se taj stup savija prema gore u obliku luka, zbog termičkog hidrostatskog tlaka na vruće plinove (plazmu) prema gore. [6]

Karakteristike električnog luka: [6]

- u njemu se pri zavarivanju nalaze plinovi u stanju plazme i metalne pare,
- dobro provodi električnu struju koja kroz njega protiče,
- ima određenu dužinu, napon i električni otpor
- oko električnog luka se stvara magnetsko polje (kao oko vodiča),
- toplinski je provodljiv,
- zrači elektromagnetska zračenja: vidljivog dijela spektra, ultraljubičasto i infracrveno zračenje,
- temperatura luka kreće se prosječno 6000 °C - 8000 °C,
- strujanje vrućih plinova je usmjereno prema gore, a tlak električnog luka na površinu taline,
- dolazi do prijelaza kapljica metala kroz električni luk, te do reakcije kapljica s atmosferom luka, ako nije inertna.

Električni luk je posljedica ionizacije - pražnjenja elektriciteta u zraku, u raznim zaštitnim plinovima, odnosno u metalnim parama. Električni luk u zavarivanju (zato i nazivamo elektrolučno zavarivanje) predstavlja trajni i snažni električni izboj u prostoru ispunjenim plinom između elektrode i predmeta koji se zavaruje. U električnom krugu zavarivački luk je pretvarač električne energije u toplinsku, svjetlosnu i druge oblike energije. Toplina električnog luka koristi se za mjestimično zagrijavanje materijala do temperature taljenja. S obzirom na to da zrak u normalnim uvjetima ne provodi električnu struju, zračni prostor između elektrode i radnog komada potrebno je učiniti provodljivim za električnu struju, tj. potrebno ga je ionizirati. Ionizacija zračnog prostora između elektrode i radnog komada sastoji se u stvaranju pozitivno i negativno nabijenih čestica u tom prostoru. [1]

Razlikujemo tri osnovne zone električnog luka s obzirom na njegova toplinska djelovanja: [1]

- užarena bijela zona na elektrodi koja se priključi na minus pol, glavni je izvor slobodnih elektrona i naziva se katodna mrlja,
- zona plinskog stupa,
- jako užarena zona pozitivne elektrode koja se naziva krater ili anodna mrlja.

Raspored temperatura u ovim zonama nije isti. Temperatura katodne mrlje određena je temperaturom taljenja materijala elektrode i kreće se oko 3000 °C. U plinskom stupu temperatura se podiže na 5000 - 6000 °C. U području anode temperatura je viša nego u području katode. To se objašnjava time što se neutralizacija električno nabijenih čestica događa intenzivnije u području anode, pa je prema tome veća i količina oslobođene topline. [1]

U praksi za slučaj napajanja električnog luka istosmjernom strujom, elektroda se obično priključuje na minus pol, a osnovni materijal na plus pol. Katodna mrlja se tada nalazi na elektrodi. Kod upotrebe bazičnih elektroda obično se elektroda priključuje na plus pol, što uvjetuje sastav materijala elektrode i obloge. [1]

Nakon što je uspostavljen električni luk, struja koja teče kroz kontaktnu površinu, uslijed otpora koji joj se ovdje pruža, zagrije kontaktno mjesto (vrh elektrode i dodirnu točku radnog komada) na visoku temperaturu i rastali ih toliko da dostignu točku isparavanja. Razviju se metalne pare koje ioniziraju prostor između elektrode i radnog komada i time pospješuju daljnji proces prijelaza električne struje. Energija se prenosi na predmet direktno udarom elektrona (pretvorbom kinetičke energije u toplinsku), konvekcijom i zračenjem topline iz električnog luka, te prijenosom topline kapljicama materijala. [1]

2.4. UTJECAJ SILA NA PRIJENOS METALA U ELEKTRIČNOM LUKU

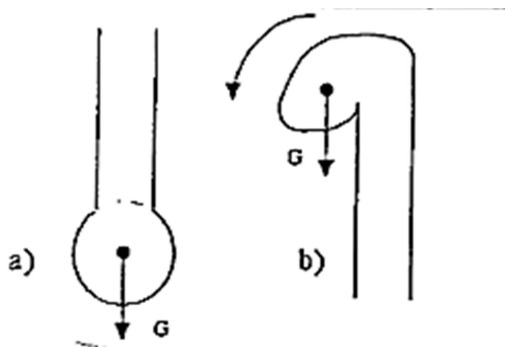
Kod elektrolučnih postupaka zavarivanja taljivom elektrodom, rastaljeni dodatni materijal, tj. materijal same elektrode, prenosi se općenito u obliku kapljica na željeno mjesto oblikujući zavareni spoj [3]. Oblik prijenosa metala kroz električni luk ovisi o polaritetu elektrode, jakosti struje zavarivanja, naponu zavarivanja, vrsti zaštitnog plina, sastavu žice te o karakteristikama izvora struje zavarivanja. Ako je žica priključena na minus pol, prijenos metala se vrši krupnijim kapljicama nego kada je žica priključena na plus pol. Povećanjem napona, ako su ostali parametri konstantni raste duljina el. luka i prijenos metala se vrši krupnijim kapima. Ako je zaštitni plin argon, prijenos metala se vrši sitnijim kapima nego kada se kao zaštitni plin koristi ugljični dioksid. [4]

Površinska napetost igra veliku ulogu u prijenosu dodatnog materijala. Površinska napetost može biti u stanju spriječiti istjecanje rastaljenog dodatnog materijala za vrijeme zavarivanja u prisilnim položajima, ako talina nije prevelika. Za vrijeme zavarivanja u položenom horizontalnom položaju, gravitacija će također pomoći da se rastaljeni metal održava u pravom položaju. Iskustvo nam međutim govori da je zavarivanje taljivim elektrodama, čak i u vertikalnom i u nadglavnom položaju moguće i da rastaljeni dodatni materijal ide od elektrode k rastaljenom metalu zavora, neovisno o polaritetu. Očigledno postoje sile koje djeluju konstantno u smjeru radnog komada, i da su jake barem kao i sila gravitacije. [1]

Prijenos metala omogućuju određene sile i pojave koje se pojavljuju u električnom luku. Neke od tih sila povoljno utječu na prijenos metala, a neke nepovoljno. Poznavanje nastanka i djelovanja tih sila i pojava omogućuje upravljanje prijenosom dodatnog materijala i otklanjanje ili smanjivanje nepovoljnih utjecaja. Neke sile djeluju tako da pomažu prijenos dodatnog metala, a neke se protive smjeru prijenosa metala i otežavaju ga. Ako je rezultantna sila $F > 0$ dolazi do prijenosa metala u aksijalnom smjeru. Neke od sila koje se pojavljuju kod prijenosa materijala su: [3]

- Sila gravitacije,
- Elektromagnetske sile,
- Magnetsko puhanje električnog luka,
- Sile površinske napetosti,
- Sile strujanja i pritiska plazme luka,
- Eksplozijske sile,
- Sile zbog djelovanja plinova.

Sila gravitacije uvijek djeluje kod prijenosa dodatnog materijala i njeno djelovanje se ne može izbjeći. U slučaju zavarivanja u položenom položaju, kada se prijenos materijala odvija u pravcu djelovanja sile teže, njezino djelovanje je povoljno, dok je u svim ostalim prisilnim položajima manje ili više nepovoljno. U slučaju zavarivanja u nadglavnom položaju, kada je masa kapljice velika, a ostale sile premale, uopće ne može doći do prijenosa kapljice u zavar. [3] Slikom 3 prikazan je utjecaj sile gravitacije na prijenos dodatnog materijala.



Slika 3. Utjecaj sile gravitacije na prijenos dodatnog materijala [3]

- a) Pozitivan pri zavarivanju u položenom položaju
- b) Negativan pri zavarivanju u prisilnim položajima

Elektromagnetske sile koje se pojavljuju u električnom luku posebice kod postupka zavarivanja žičanom elektrodom u plinskoj zaštiti su najvažnije za prijenos dodatnog materijala. Poznata je činjenica da se oko vodiča kroz koji teče električna struja javlja magnetsko polje čije su silnice raspoređene koncentrično oko vodiča. Te sile djeluju radijalno prema sredini vodiča i okomito na liniju toka struje. U slučaju cilindričnog vodiča, sile djeluju okomito na os vodiča. No u slučaju kada linije toka divergiraju kao što se dešava u plazmenom stupu električnog luka ili u kapljici metala na samom vrhu žičane elektrode, djelovanje je opet usmjereno okomito na linije toka struje. S obzirom na os vodiča te se sile daju rastaviti na dvije komponente, jednu radijalnu, okomitu na os vodiča koja izaziva lokalno suženje presjeka na rastaljenom vrhu elektrode (žice) oblikujući kapljicu, i drugu u aksijalnom pravcu koja daje pogon otkinutoj kapljici usmjerujući je prema radnom komadu. Ovisno o odnosima ovih komponenti, vrsti zaštitne atmosfere i djelovanju ostalih sila mogu se pojaviti razne kombinacije utjecaja i ova sila može ponekad biti nedovoljna da osigura odbacivanje kapljice dodatnog materijala prema radnom komadu [3]. Elektromagnetska sila (Lorentzova sila) nastaje zbog utjecaja magnetskog polja na rastaljenu kapljicu kroz koju protječe struja.

Ta sila je okomita na površinu vodiča, a ima radijalnu i aksijalnu komponentu. F_{emr} radijalna je komponenta te sile koja uzrokuje „pinch“ efekt (suženje vrata kapljice). [1]

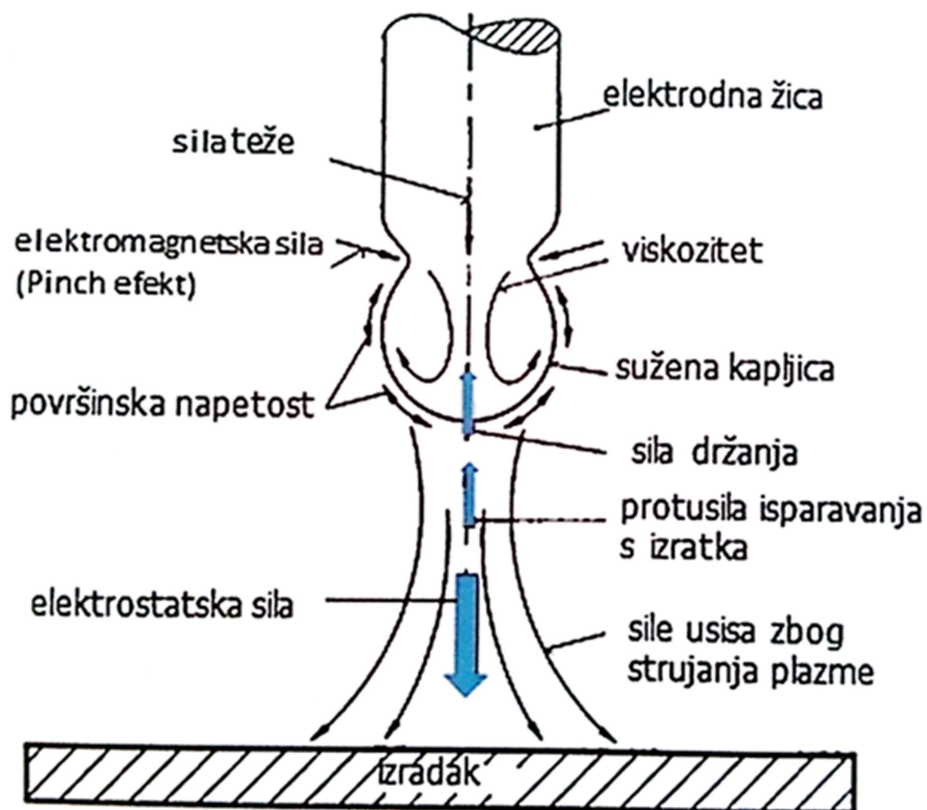
Puhanje električnog luka rezultira nedovoljnim zagrijavanjem materijala na mjestima gdje je luk otpuhnut, pa se u materijalu zavora pojavljuju uključci troske, nedovoljno spajanje materijala, slab provar i slično. Veličina puhanja luka ovisi osim o jakosti i vrsti struje i o dimenzijama osnovnog materijala, te mjestu priključka mase. [4]

Sile površinske napetosti utječu na prijenos metala u kombinaciji s ostalim silama. Velika površinska napetost zahtijeva veliku silu za njeno svladavanje, a to znači da će otkidanje kapljice biti teže i tek kad ona dosegne određenu masu. Velika površinska napetost u većini slučajeva nepovoljno djeluje na prijenos metala, iako za podržavanje same taline zavora može biti korisna, osobito u prisilnim položajima. [3] Kada se kapljica nalazi na vrhu dodatnog materijala, ova sila se protivi prijenosu. Kisik smanjuje, a dušik povećava silu površinske napetosti. Dodatkom 1 - 5% O_2 u Ar postiže se lakše otkidanje kapi i prijenos metala u sitnijim kapima. [1]

Strujanje plazme električnog luka djeluje na gibanje i usmjeravanje kapljice dodatnog materijala. U plazmenom stupu električnog luka, u blizini vrha elektrode vlada određeni pritisak p , budući da se isti volumen plazme plina širi uslijed promjene dimenzija luka u blizini radnog komada, u tom djelu vlada niži pritisak. Ova razlika tlakova povoljno djeluje na prijenos kapljica metala, uključujući i na otkidanje i na ubrzavanje kapljice. [3] Djeluje u smjeru prijenosa metala kao magnetsko polje luka koje uzrokuje strujanje plazme od manjeg prema većem promjeru električnog luka. [1]

Eksplozijske sile. Na gibanje kapljica imaju utjecaj i apsorbirani plinovi iz atmosfere luka ili postojeći u materijalu žice u rastaljenoj metalnoj kapljici. Pri povišenim temperaturama topivost plinova u metalu je veća, a hlađenjem ona pada i upijeni plinovi moraju napustiti talinu. Kako hlađenje počinje izvana stvarajući krutu opnu, plinovi se sakupljaju u unutrašnjosti kapi. S povećanjem količine plinova raste tlak i on može konačno razoriti kapljicu u više dijelova. Istrujavanje sakupljenih plinova po reaktivnom principu ubrzava kapljicu, ali je smjer djelovanja ove sile nepredvidiv, jer do izlaska plinova dolazi na slučajnom mjestu. Ako je ova sila usmjerena prema zavoru onda je korisna, a u protivnom slučaju izaziva štrcanje izvan područja zavora. [3]

Sile zbog djelovanja plinova oko elektrode također sudjeluju u prijenosu metala. U slučaju primjene zaštitnih plinova koji struje oko žičane elektrode (MIG/MAG) javlja se izvjesno injekcijsko djelovanje. Slika 4 prikazuje interakciju sila u električnom luku.



Slika 4. Interakcija sila i djelovanje „pinch“ efekta u električnom luku [2]

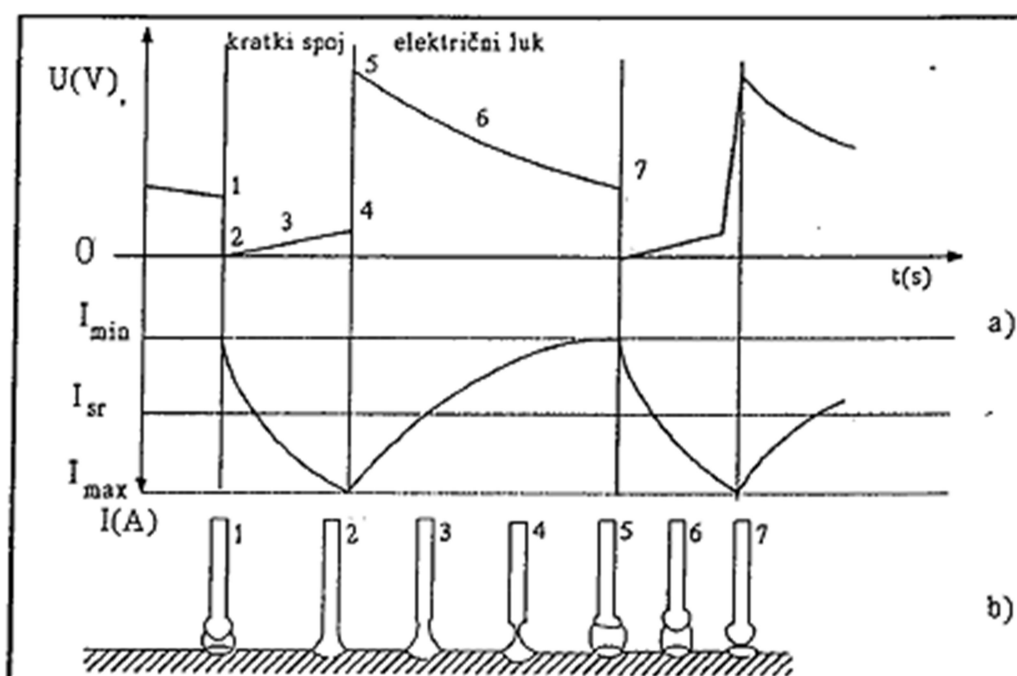
2.5. NAČINI PRIJENOSA DODATNOG MATERIJALA U ELEKTRIČNOM LUKU

Prilikom zavarivanja postoje dva osnovna načina prijenosa dodatnog materijala do radnog komada odnosno taline. Materijal se može prenositi slobodnim letom kapljica ili premošćivanjem. Zbog specifičnosti pojava i duljine električnog luka kod prijenosa metala premošćivanjem razlikujemo: prijenos metala kratkim spojevima i prijenos metala mješovitim lukom, a kod prijenosa slobodnim letom kapljice: štrcajući luk i prijenos materijala impulsnim strujama. [3]

2.5.1. PRIJENOS METALA KRATKIM SPOJEVIMA

Prijenos metala kratkim spojevima se ostvaruje pri malim gustoćama struje i malim naponima, i karakterizira ga niski unos energije. Upotrebljava se za zavarivanje tankih limova i u prisilnim položajima zavarivanja, pri zavarivanju žicama promjera do 1,2 mm uz napon 15 do 23 V i jakosti struje do 190 A. [4]

Slika 5 a) prikazuje pojednostavljeni osciloskopski prikaz procesa pomoću dviju funkcija: $U = f(t)$, i $I = f(t)$. Na slici 5 b) dan je shematski prikaz pojava.

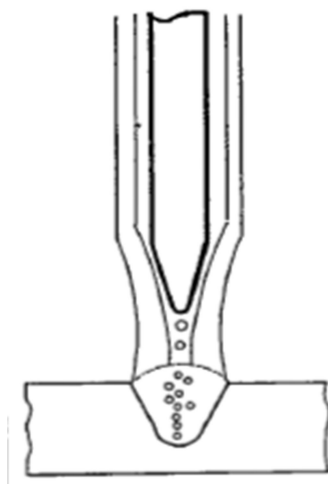


Slika 5. MIG/MAG prijenos metala kratkim spojevima [3]

Na slici 5, točka 1 prikazuje stanje kada je žičana elektroda udaljena od radnog komada, te u tom trenutku postoji električni luk. Napon el. luka ima zadanu vrijednost. Kada žičana elektroda dotakne radni komad, točka 2, struja počinje eksponencijalno rasti. Brzina rasta ograničena je induktivnim otporima kruga. Obzirom da u strujnom krugu otpor ima konačnu vrijednost, napon polagano raste (točke 3, 4) zbog povećanja otpora. Do povećanja otpora dolazi zbog toga što povećanjem struje dolazi do pojačanog zagrijavanja vrha žice (efekt $Q = I^2 R$, sve do taljenja), a s povećanom strujom, povećava se i „pinch“ efekt. On dovodi do smanjenja presjeka žice (izazivajući povećani otpor) i konačno do otkidanja zagrijanog vrha žice. Time se kratki spoj prekida i električni luk se ponovno uspostavlja (točka 5), a struja počinje eksponencijalno padati na nominalnu vrijednost. Skok napona je, opet zbog induktiviteta krugova nešto veći od nominalnog i u toku vremena se smanjuje na nominalnu vrijednost (točke 6, 7). Treba imati u vidu da se sve ovo zbiva dok se žičana elektroda jednolikom brzinom kreće prema radnom komadu. Dakle, kada žica ponovno premosti razmak nastao otkidanjem njenog vrha, ponavlja se ciklus od točke 1. Broj ovakvih ciklusa u jednoj sekundi varira u ovisnosti od promjera žice i nametnutih parametara. Pri stabilnim parametrima obično ima između 100 i 200 kratkih spojeva u sekundi. [3]

2.5.2. PRIJENOS METALA ŠTRCAJUĆIM LUKOM

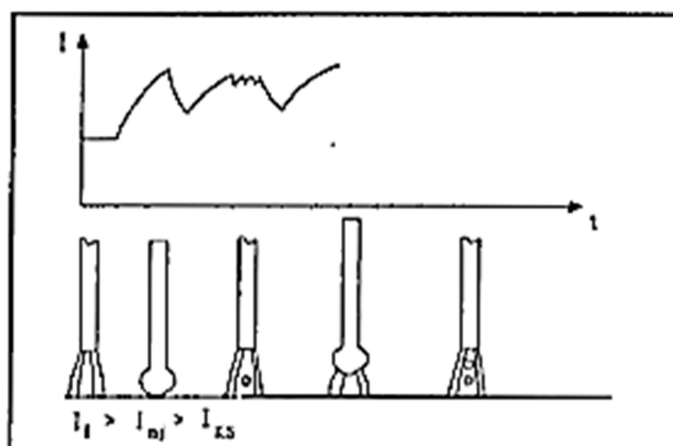
Prijenos metala štrcajućim lukom ostvaruje se pri naponima od 25 - 40 V i jakostima struje zavarivanja od preko 200 A, pri zavarivanju žicama promjera 1,2 mm. Postiže se visok učinak taljenja. Prijenos kapi se zbog visoke gustoće struje vrši bez kratkih spojeva. Ova se vrsta električnog luka koristi pri zavarivanju žicama promjera većim od 1,2 mm za popunjavanje žlijeba pri zavarivanju debelih limova, te za zavarivanje debljih materijala [4]. Za ovaj način prijenosa materijala karakteristično je da se prijenos dodatnog materijala s vrha elektrode vrši slobodnim letom malih kapljica kroz atmosferu luka. Niti u jednom trenutku u vremenu održavanja luka elektroda ne dolazi u kontakt s osnovnim materijalom. To znači da sile koje djeluju u električnom luku otkidaju kapi i usmjeruju ih (manje ili više aksijalno u odnosu na elektrodu) prema radnom komadu prije nego vrh elektrode može dodirnuti radni komad. Da bi se ostvario ovakav način prijenosa dodatnog materijala potrebna je velika energija. Naime, potrebno je ostvariti velike sile i zagrijavanjem ili na neki drugi način smanjiti sile površinske napetosti koje utječu na veličinu kapljice metala. Kod postupka zavarivanja u zaštitnoj atmosferi taljivom elektrodom dosta jasno se može uočiti veličina struje kada nestaju kratki spojevi, to jest kada se ostvaruju uvjeti za prijenos štrcajućim lukom. Ta veličina se naziva kritičnom strujom (I_{KR}). I_{KR} je svojstvena za određene zaštitne plinove i njihovim sastavom se može utjecati na njenu veličinu. S obzirom na veliku toplinsku energiju oslobođenu u štrcajućem električnom luku, velikom strujom zavarivanja postiže se velika količina rastaljenog metala, što je povoljno za produktivnost, ali samo u slučaju zavarivanja debljih materijala i to u položenom položaju. U protivnom kod tanjih materijala postoji opasnost prokapljivanja (protaljivanja), a u prisilnim položajima i do cijedenja velike količine rastaljenog materijala zbog djelovanja sile gravitacije. [3] Slikom 6 prikazan je prijenos dodatnog materijala štrcajućim lukom.



Slika 6. Prijenos dodatnog materijala štrcajućim lukom kod MIG/MAG zavarivanja [3]

2.5.3. PRIJENOS METALA MJEŠOVITIM LUKOM

Mješoviti (prijelazni) luk se ostvaruje pri naponima od 18 do 25 V i jakostima struje zavarivanja 150 do 200 A, pri zavarivanju žicama promjera 1,2 mm. Prijenos metala se vrši djelomično kratkim spojevima, a djelomično prolazom kapi kroz električni luk kao pri zavarivanju štrcajućim lukom [4]. Kod ovog načina prijenosa dodatnog materijala u električnom luku kapljice dodatnog materijala veće su od promjera elektrode što dodatno pogoršava stabilnost el. luka. Oscilogram ovog načina prijenosa dodatnog materijala dan je na slici 7.

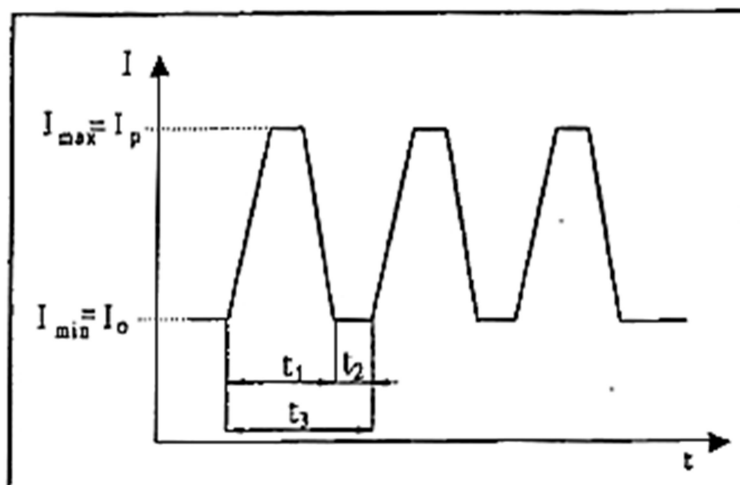


Slika 7. Prijenos metala mješovitim lukom [3]

Nedostatak takvog prijenosa metala je njegova neregularnost, tj pojava kratkih spojeva je slučajna što izaziva nepredvidivo štrcanje materijala, pa se parametri koji daju ovakav način prijenosa materijala izbjegavaju. [3]

2.5.4. PRIJENOS METALA IMPULSNIM STRUJAMA

Budući da se inače poželjan način prijenosa dodatnog materijala u malim kapljicama ostvaruje tek iznad određenog kritičnog praga (I_{KR}), razvijen je način impulsnog prijenosa dodatnog materijala. Kod ovog načina, prosječna struja zavarivanja manja je od I_{KR} koja bi dala nepravilan i neprihvatljiv prijenos grubim kapima, ali modulira se jačom strujom određene frekvencije, tako da struja varira između neke minimalne vrijednosti nazvane osnovna struja i maksimalne nazvane strujom impulsa. Pri tome osnovna struja ima zadatak da održava električni luk, dok je visina i duljina trajanja impulsa jake struje prilagođena da se premaši I_{KR} i osigura odvajanje jedne kapi po svakom impulsu. Impulsi mogu biti sinusnog, trokutastog ili četvrtastog oblika, ali za upravljanje procesom prijenosa materijala povoljniji je četvrtasti oblik. Na slici 8 su prikazani impulsi trapeznog oblika. Na taj način se osigurava prijenos štrcajućim lukom pri malim prosječnim vrijednostima struje, tj. pri maloj ukupno unesenoj energiji. Kod ovog načina zavarivanja podešavanje parametara je prilično složeno, jer treba uskladiti 5 parametara (veličinu osnovne struje, veličinu impulsne struje, trajanje impulsa osnovne struje, trajanje impulsa jake struje, brzinu dodavanja žice). Izbor podesnih parametara danas vrše elektronički programirani uređaji koji za jednu izabranu vodeću veličinu biraju optimalnu kombinaciju ostalih parametara, sinergijski izvori. Impulsni način prijenosa zadržava prednosti, a otklanja nedostatke koje ima štrcajući luk, tj. moguće je primijeniti ga u svim položajima zavarivanja, te za materijale osjetljive na količinu unesene topline. Nadalje jednim promjerom žice moguće je zavariti širi raspon debljina materijala jer je i za deblje žice moguće namjestiti male prosječne struje potrebne kod zavarivanja tanjih limova [3]. Na slici 8 prikazan je primjer valnog oblika impulsne struje u ovisnosti o vremenu.



Slika 8. Promjena struje u ovisnosti o vremenu pri impulsnom zavarivanju [3]

I_0 – osnovna razina jakosti struje

I_p – jakost struje impulsa

t_1 – vrijeme trajanja impulsa

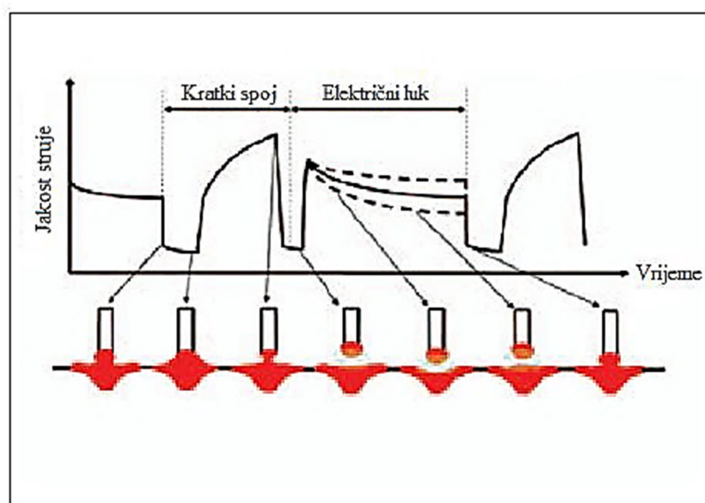
t_2 – vrijeme trajanja osnovne struje

t_3 – vrijeme jednog ciklusa

3. CBT - CONTROLLED BRIDGE TRANSFER

3.1.OPIS POSTUPKA MAG - CBT

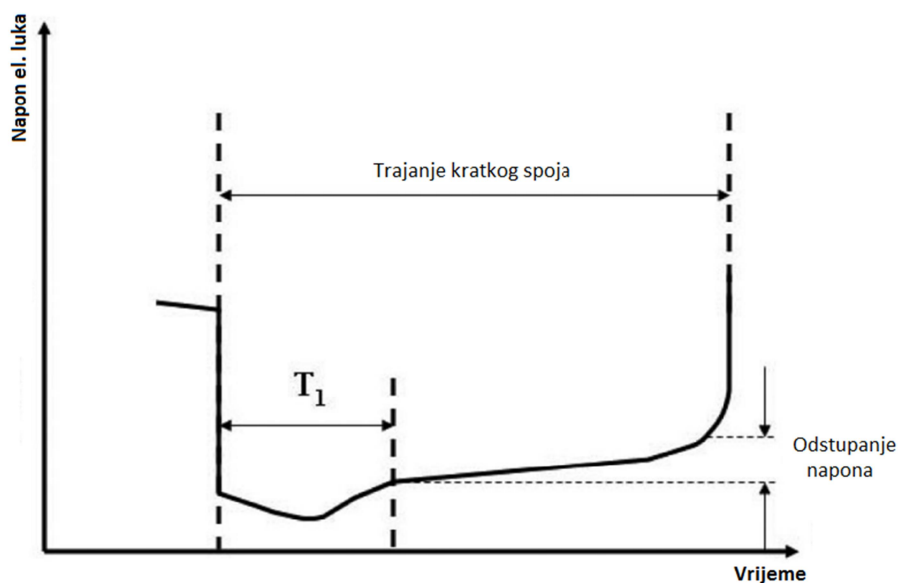
MAG postupak zavarivanja prikladan je za zavarivanje tankih limova, ali je u području minimalnog unosa topline, tj. kratkom luku osjetljiv na štrcanje rastaljenih kapljica kao posljedica nestabilnog procesa. Potrebno je naglasiti da prvenstveno automobilska industrija kao i druge koje primjenjuju tanke limove kontinuirano zahtijevaju od proizvođača opreme za zavarivanje razvoj u smjeru produktivnosti, ali i smanjenja naknadne obrade kako bi se smanjila količina industrijskog otpada i dodatni troškovi nastali otklanjanjem posljedica štrcanja. Kao trenutno najučinkovitiji postupak zavarivanja, u smislu male količine štrcanja, koristi se impulsno MIG/MAG zavarivanje, ali se bilježi i pojava modificiranih procesa. Klasično MIG/MAG zavarivanje kratkim spojevima, pomoću kojeg je moguće smanjiti unos topline u radni komad, koristi se kako bi se eliminiralo protaljivanje tanjih radnih komada. No pri korištenju klasičnog MIG/MAG postupka zavarivanja dolazi do veće količine štrcanja i to u trenutku ponovne uspostave električnog luka odmah nakon prekida kratkog spoja. Opisana problematika rezultirala je razvojem nove metode prijenosa metala koja kombinira prednosti impulsnog i klasičnog MIG/MAG zavarivanja – CBT, Controlled Bridge Transfer metoda. Najproblematičniji i najčešći trenutak pojave štrcanja pri MIG/MAG zavarivanju kratkim spojevima je odmah nakon prekida kratkog spoja, odnosno u trenutku ponovne uspostave električnog luka. Kako bi se smanjila pojava štrcanja kada na rastaljeni materijal djeluje sila „pinch efekta“, potrebno je precizno odrediti iznos pada napona u trenutku neposredno prije ponovne uspostave električnog luka. U skladu s padom napona u istom trenutku dolazi i do pada vrijednosti jakosti struje (slika 9). [2]



Slika 9. Princip CBT MIG/MAG postupka zavarivanja [7]

Kao rezultat toga, prijenos rastaljenog metala s vrha elektrodne žice vrši se isključivo pomoću površinske napetosti. Trenutak u kojem se odvija odvajanje kapljice može zbog različitih nepravilnosti (duljina slobodnog kraja žice; brzina zavarivanja; položaj zavarivanja; veličina, oblik i viskoznost rastaljene kapljice metala; ponašanje taline) varirati. Kako bi se premostile navedene prepreke, jakost struje podešava se optimalno prema varijabilnom parametru napona električnog luka. Na taj način je moguće upravljati prijenosom metala za vrijeme kratkog spoja i stabilizirati električni luk. Pomoću ove metode moguće je precizno nadziranje procesa odvajanja rastaljene kapljice metala u svrhu predviđanja trenutka pojave kratkog spoja/ponovne uspostave električnog luka čime se minimalizira pojava štrcanja. Opisana tehnologija zavarivanja rezultira smanjenjem ili u potpunosti eliminacijom štrcanja, a zbog precizno kontroliranog procesa i smanjenog unosa topline i mogućnošću zavarivanja korijenskih prolaza s većim razmacima kao i zavarivanje ploča debljine manje od promjera dodatnog materijala (što uvelike utječe na troškove izrade konstrukcije). [2]

Slikom 10 prikazan je princip preciznog predviđanja trenutka ponovne uspostave električnog luka pomoću mjerenja napona zavarivanja.

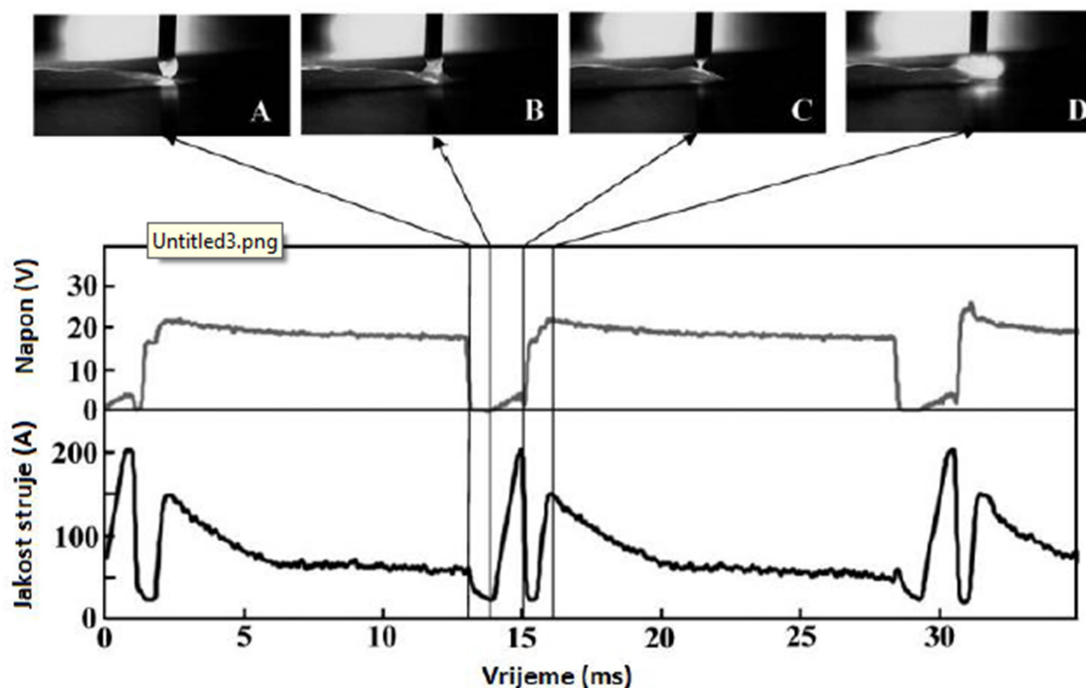


Slika 10. Predviđanje trenutka ponovne uspostave električnog luka [8]

Period kratkog spoja u kojem napon još nije počeo rasti označen je na slici s T_1 i napon u tom intervalu smatra se referentnim naponom. Daljnje odstupanje od referentnog napona konstantno se mjeri, te u trenutku u kojem odstupanje dosegne točno određenu graničnu vrijednost, dolazi do ponovne uspostave električnog luka. Npr. kod MAG postupka zavarivanja u zaštiti 80% Ar + 20% CO₂ optimalno odstupanje napona je u intervalu 1,2 do

2,0 V. Preciznim predviđanjem trenutka ponovne uspostave električnog luka, i smanjivanjem struje neposredno prije uspostave električnog luka, rastaljena se kapljica prenosi u talinu zavora samo pomoću sile površinske napetosti i štrcanje se uspijeva kontrolirati. [8]

Slika 11 prikazuje prijenos rastaljene kapljice metala s elektrode u osnovni materijal (pri CBT načinu prijenosa metala) pomoću visokobrzinske kamere u korelaciji s promjenom struje i napona.



Slika 11. Prijenos rastaljenog metala pri MAG CBT i dijagram napona i struje u ovisnosti o vremenu [9]

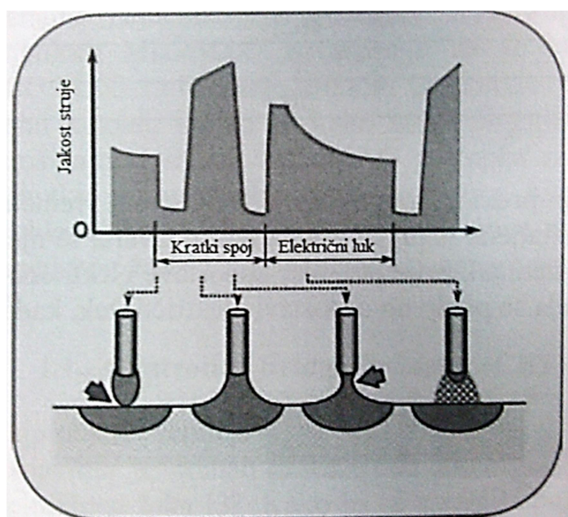
Kadar A na slici 11 prikazuje trenutak odmah nakon prekida kratkog spoja. Prolaskom vremena na kadrovima B i C moguće je vidjeti prijenos rastaljene kapljice prema talini zavora, te njen stisnuti oblik na vrhu kapljice. Kadar C prikazuje trenutak prije ponovne uspostave električnog luka kada je jakost struje već smanjena, tako da kada se ponovno uspostavi električni luk, kadar D, ne dolazi do pojave štrcanja. [2]

Bez obzira na slobodni kraj žice MAG - CBT proces zavarivanja je uvijek stabilan bez štrcanja i uz minimalne promjene u jakosti struje i napona. Minimalne promjene u parametrima (jakost struje i napon) zahtijevaju prilagodbu tehnike rada zavarivača, jer on više nije u mogućnosti promjenom slobodnog kraja žice (odnosno pomicanjem pištolja za zavarivanje gore - dolje) znatno utjecati na promjenu struje i time definirati brzinu taljenja.

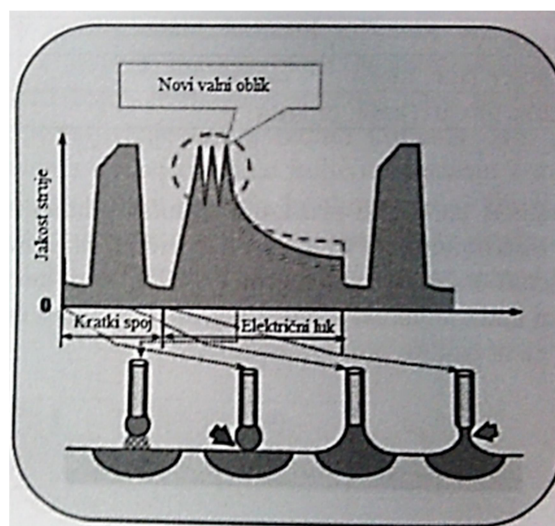
Zbog kvalitete prijenosa metala u električnom luku CBT metoda nadoknađuje slabiju tehniku rada zavarivača jer može kompenzirati promjene duljine električnog luka vrlo brzo, a bez utjecaja na kvalitetu zavora i količinu štrcanja. [2]

3.2. CBT – EX proces

Klasičnim CBT postupkom zavarivanja moguće je smanjiti pojavu štrcanja samo u rasponu parametara koji odgovaraju prijenosu metala kratkim spojevima. Pojačavanjem parametara dolazi se do prijenosa dodatnog materijala mješovitim lukom koji se koristi kako bi se povećala proizvodnost procesa i brzina zavarivanja. U tom rasponu parametara više nije moguće koristiti klasični CBT postupak već ga je potrebno nadograditi, odnosno primijeniti novu inačicu: Controlled Bridge Transfer – Expanded, CBT-EX. [2]



Slika 12. Opći valni oblik struje pri MAG zavarivanju [2]



Slika 13. Valni oblik struje pri zavarivanju u 100% CO₂ zaštiti [2]

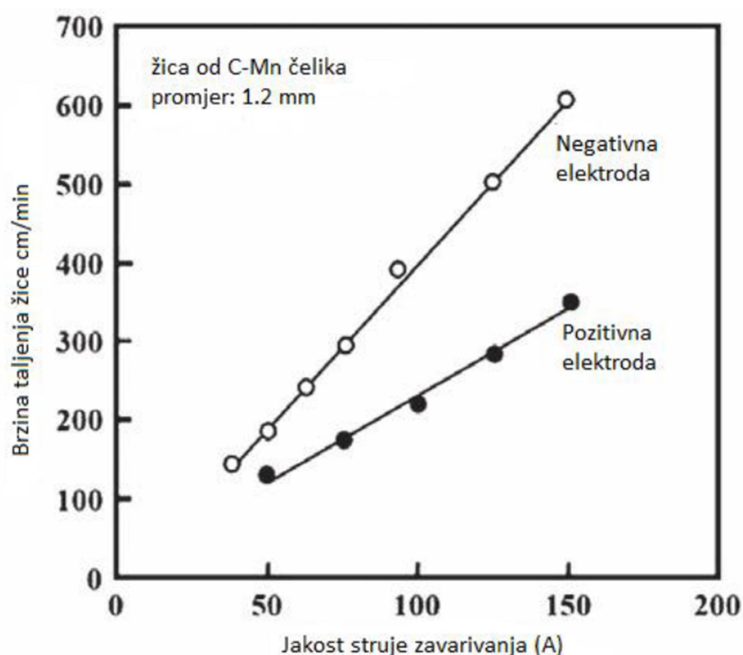
Smanjenje pojave štrcanja prije ponovne uspostave električnog luka slično je kao i u slučaju CBT procesa. No da bi se u prijenosu dodatnog materijala mješovitim lukom predvidjela ponovna uspostava električnog luka, razvijen je novi visokoprecizni i visokobrzinski „Welbee“ mikroprocesor. Osim preciznog predviđanja pojave električnog luka, pomoću ovog mikroprocesora moguće je formirati rastaljenu kapljicu metala odgovarajućih dimenzija i oblika na samom vrhu elektrode i to pomoću fine regulacije duljine električnog luka. Na slici 12 prikazan je općeniti valni oblik struje za MIG/MAG zavarivanje. Vidljivo je da u trenutku prije uspostave električnog luka, struja kratkog spoja naglo pada što uzrokuje i smanjenje učina taljenja dodatnog materijala. S obzirom na to da je kod prijenosa dodatnog materijala

mješovitim lukom brzina dodavanja žice veća nego što je to u slučaju prijenosa metala kratkim spojevima kako bi se nadoknadio gubitak energije, zbog smanjenja jakosti struje kratkog spoja, i na taj način se postigla odgovarajuća veličina rastaljene kapljice metala, u trenutku uspostave električnog luka jakost struje se naglo povećava. Nakon toga jakost struje koja se mijenja u realnom vremenu ovisno o metodi prijenosa metala i ponašanju taline, regulira duljinu električnog luka. Novorazvijeni valni oblik struje ima za posljedicu još veće smanjenje napona pri zavarivanju što omogućava manji unos topline i veće brzine zavarivanja pa se stoga može primjenjivati kod zavarivanja korijena sučeljenog spoja cijevi. [2]

Slika 13 prikazuje valni oblik struje pri zavarivanju u 100% CO₂ zaštiti. Kod prijenosa dodatnog materijala mješovitim lukom, zbog pregrijavanja visokom strujom zavarivanja, dolazi do eksplozija plina u talini i/ili rastaljenoj kapljici što dovodi do pojave štrcanja. Zbog karakteristične primjene CBT - EX tehnologije zavarivanja (zavarivanje velikim brzinama), potrebno je održavati kratki električni luk što može uzrokovati povremenu pojavu kratkih spojeva. Opisana problematika može dovesti do hlađenja taline metala zavara. Osim navedenog, razlog štrcanju može biti i djelovanje odbojne sile na rastaljenu kapljicu zbog disocijacije ugljičnog dioksida (CO₂) na ugljični monoksid (CO) i kisik (O). Kako bi se smanjilo negativno djelovanje odbojne sile na rastaljenu kapljicu na kraju elektrode, izvršena je promjena u valnom obliku struje. Promjena se očituje u trokutastom profilu valnog oblika struje koji se nadodaje na osnovnu struju za vrijeme trajanja električnog luka. Na taj način se postiže stabilan prijenos dodatnog materijala, regulacija trajanja električnog luka i optimalan omjer pojave kratkog spoja/električnog luka pri parametrima koji inače karakteriziraju prijenos dodatnog materijala mješovitim lukom. [2]

3.3. EN – CBT proces

CBT način prijenosa metala moguće je provoditi elektrodom spojenom na minus pol (EN, eng. electrode negative) što omogućuje mali unos topline i smanjeno štrcanje. Pri EN - CBT postupku količina topline na elektrodi, veća je od količine topline unešene u osnovni materijal. Zbog toga je veća i količina depozita u odnosu na CBT s elektrodom na + polu. Prilikom zavarivanja EN - CBT postupkom vrijednost struje zavarivanja je $\frac{2}{3}$ vrijednosti struje zavarivanja s pozitivnom elektrodom pri jednakoj količini depozita. Drugim riječima EN - CBT omogućuje manji unos topline pri jednakoj količini depozita u odnosu na zavarivanje s elektrodom spojenom na + pol. Slika 14 prikazuje usporedbu brzine taljenja žice promjera 1,2 mm kada je spojena na pozitivan pol i kada je spojena na negativan pol, u zaštitnoj atmosferi 100% CO₂. [9]



Slika 14. Usporedba brzine taljenja žice pri zavarivanju na pozitivnom i negativnom polu [9]

Za vrijeme EN - CBT procesa, iako su blaga kolebanja napona luka uzrokovana ponašanjem katodne mrlje na vrhu elektrodne žice, trenutni se napon koristi pri izračunavanju parametara korištenih pri naredbi za održavanje stabilnosti luka. Na taj način optimiziramo valni oblik struje zavarivanja za dobivanje najbolje karakteristike luka. [9]

3.4. AC – CBT proces

AC – CBT (eng. Alternating current – CBT) postupak je inačica klasičnog CBT postupka u kojem se koristi izmjenična struja male frekvencije (promjene pozitivnog i negativnog pola). Vrijeme trajanja pozitivnog i negativnog polariteta mjeri se pomoću frekvencije i omjera negativnog i pozitivnog pola. Iako je brzina taljenja žice za vrijeme trajanja negativnog polariteta otprilike 1,5 puta veća, moguće je postići stabilan prijenos metala za vrijeme oba polariteta. Ta se stabilnost postiže novorazvijenim uređajima i mikroprocesorima koji omogućuju preciznu kontrolu parametara električnog luka (struja, napon) i za vrijeme pozitivnog i za vrijeme negativnog polariteta. Prednost ovog postupka je smanjivanje penetracije s povećanjem omjera negativnog polariteta. Kao rezultat toga, uz preciznu kontrolu unosa topline u osnovni materijal ostvareno je i jednostavno kontroliranje oblika zavora. Isto tako se smanjila pojava štrcanja do 6 puta u odnosu na konvencionalno AC – MAG zavarivanje. [10]

4. ULOGA ZAŠTITNIH PLINOVA PRI ZAVARIVANJU

Mjesto zavarivanja, kapljice rastaljenog metala za vrijeme leta kroz električni luk i talina moraju se zaštititi od djelovanja okolne atmosfere. Ta zaštita se uspješno može izvesti pomoću odgovarajućih zaštitnih plinova. Postoji mogućnost primjene čitavog niza plinova bilo inertnih, bilo aktivnih ili njihovih mješavina. Poznavanje utjecaja zaštitnih plinova je neophodno da bi se moglo ocijeniti njihovo djelovanje. Utjecaj zaštitnih plinova odražava se na: [3]

- Električno - fizikalna svojstva električnog luka, i time na prijenos metala s elektrode na radni komad,
- Metalurške procese u talini zavora,
- Tehnološke parametre.

Primarna funkcija plina kod MIG/MAG zavarivanja je stvaranje zaštite oko područja zavarivanja kako nebi došlo do kontaminacije metala zavora. To je nužno jer većina metala zagrijavanjem razvije veliki afinitet stvaranju oksida i u manjoj mjeri nitrida. Tako dolazi i do reakcije kisika s rastaljenim metalom što u konačnici može imati značajan utjecaj na izgled i kvalitetu zavarenog spoja. Osim što služi kao zaštitna atmosfera, plin svojim djelovanjem utječe i na karakteristiku električnog luka, način prijenosa metala, profil zavora/navara, brzinu zavarivanja, pojavu ugorina, čišćenje površine i svojstva metala zavora. Razumijevanjem osnovnih fizikalnih i kemijskih svojstava zaštitnog plina omogućava se pravilan odabir zaštitnog plina ili mješavine plinova za određenu primjenu. Ukoliko se odabere najbolja opcija za zaštitni plin, moguće je ostvariti kvalitetne zavarene spojeve kao i značajne uštede u cjelokupnoj izradi konstrukcije. [11]

4.1. ZAŠTITNI PLINOVI KOJI SE KORISTE PRI MAG ZAVARIVANJU

Općenito, najčešće korišteni zaštitni plinovi za MAG zavarivanje su: ugljikov dioksid (CO_2) i razne mješavine (dvokomponentne i trokomponentne) ugljikovog dioksida (CO_2), argona (Ar), kisika (O_2) i helija (He), a u malim postotcima može se pojaviti i vodik (H_2).

Najvažnija svojstva plinova koji se koriste u MAG zavarivanju su:

Kisik (komprimirani) je u normalnim uvjetima plinoviti kemijski element bez boje, okusa i mirisa. Kemijska oznaka za kisik je O_2 . Težina 1 m^3 iznosi $1,42 \text{ kg}$ [1]. Koristi se u manjim količinama (1% - 5%) u mješavini s argonom čime se dobiva dobra stabilnost luka i estetski odličan zavar. Kisik smanjuje površinsku napetost rastaljenog metala elektrodne žice, te se stvaraju sitnije kapljice koje daju finiji prijenos metala u električnom luku. [11]

Argon je inertni jednoatomni plin čije je svojstvo da se ne spaja s drugim elementima. Dobiva se iz zraka. Kemijska oznaka argona je Ar. Gustoća argona je $1,784 \text{ kg/m}^3$. Čistoća argona za zavarivanje iznosi 99,95%, a ostatak je kisik i dušik. Specijalno čisti argon može biti 99,99%. Upotrebljava se kao zaštitni plin kod elektrolučnog zavarivanja. Argon čistoće 99,95% služi za zavarivanje aluminija i aluminijevih legura, magnezija, nehrđajućeg čelika, bakra, srebra, mjedi i bronce. Specijalno čisti argon 99,99% upotrebljava se za zavarivanje cirkonija, tantala, niobija, volframa i molibdena. U specijalne svrhe u argon se dodaju mali postotci kisika ili vodika [1]. Posljedice niske energije ionizacije argona su lakša uspostava el. luka i specifičan uski profil oblika zavara. Argon je najvažniji sastojak plinskih mješavina za MAG zavarivanje. [11]

Ugljikov dioksid (CO_2) je plin bez okusa, mirisa, bezbojan je i ne gori, a pod povećanim pritiskom lako prelazi u tekuće stanje, tj. ukapljuje se. Služi kao zaštitni plin kod elektrolučnog zavarivanja nelegiranih čelika. Proizvodi se u tri kvalitete, kao tehnički CO_2 , čisti CO_2 i čvrsti CO_2 (suhi led). Transportira se u standardnim čeličnim bocama volumena 40 l. Veće punjenje nije preporučljivo, naročito ljeti jer može izazvati visoke pritiske u boci. Čisti CO_2 upotrebljava se u elektrolučnom zavarivanju [1]. Ugljikov dioksid je pri sobnoj temperaturi inertan, a u električnom luku postaje aktivan. Povećanje udjela ovog plina u mješavini ima nekoliko posljedica: povećanje iznosa kritične struje zavarivanja, smanjenje stabilnosti luka, povećanje štrcanja što je popraćeno i povećanjem gubitaka dodatnog materijala. Mješavina s argonom gdje je ugljikov dioksid u manjem omjeru poboljšava

stabilnost luka i smanjuje kritičnu struju zavarivanja. Porastom udjela ugljikovog dioksida dobiva se i „topliji“ luk koji rezultira boljom penetracijom. [11]

Helij (He) je plin koji ima visoku toplinsku vodljivost. Posljedica toga je širi profil zavora uz manju penetraciju. Kod MAG zavarivanja konstrukcijskih čelika, primjesa helija u plinskoj mješavini dovodi do većih brzina zavarivanja, bez mijenjanja oblika profila penetracije ili nastanka ugorina i poboljšava staljivanje rubova zavora. [11]

Vodik (H_2) koristi se u manjim količinama (1% - 5%) u mješavini s argonom gdje služi kao zaštitni plin pri zavarivanju austenitnih nehrđajućih čelika i legura nikla. Vodikova velika toplinska vodljivost poboljšava kvašenje i omogućava veće brzine zavarivanja. [11]



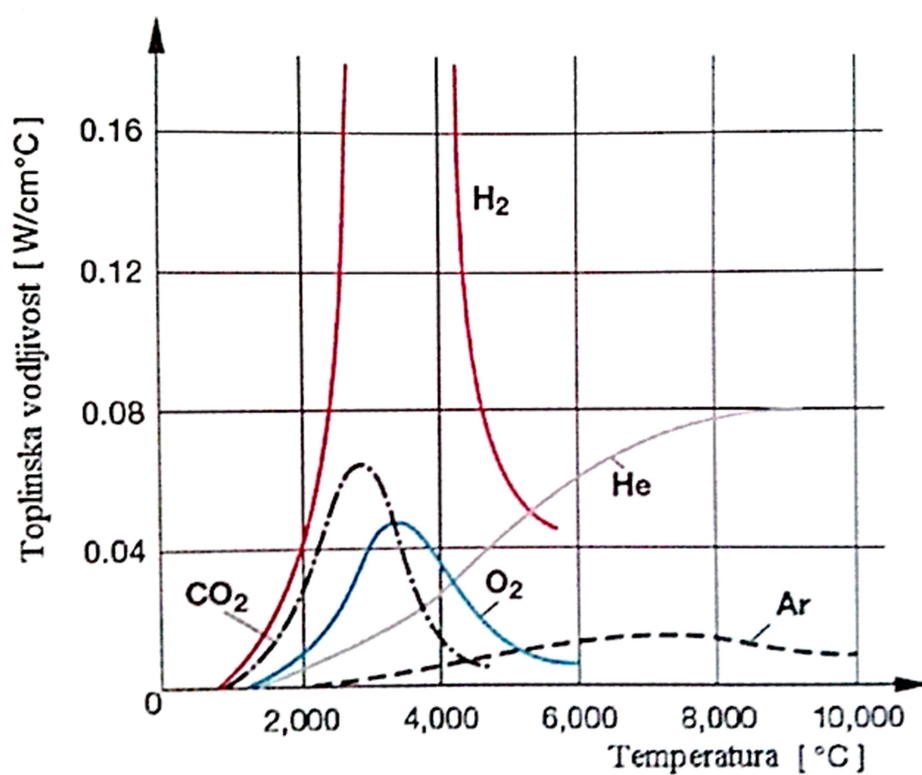
Slika 15. Utjecaj plinova na geometriju zavora [5]

Slika 15 pokazuje kako zaštitni plinovi utječu na profil zavora i dubinu penetracije u osnovni metal. Čisti ugljični dioksid kao zaštitni plin ponekad se upotrebljava za zavarivanje ugljičnih čelika, a uzrokuje pretjerano prskanje, što nije samo gubitak dodatnog materijala, već su povećani i troškovi čišćenja. [5]

Različiti zaštitni plinovi zahtijevaju više ili niže napone za uspostavu i održavanje električnog luka, što izravno utječe na unos i distribuciju topline iz čega proizlazi i utjecaj na brzinu zavarivanja, geometriju zavora, kvašenje i deformacije. Svi ti utjecaji su primarno posljedica toplinske vodljivosti i ionizacijske energije plinova. Kao moderni zaštitni plinovi uglavnom se koriste argon, helij, ugljikov dioksid, kisik i vodik. Ionizacijski potencijal prikazan u tablici 1 i toplinska vodljivost prikazana na slici 16 ovih plinova bitno se razlikuju. [12]

Tablica 1. Ionizacijski potencijal zaštitnih plinova [12]

Plin	Ionizacijski potencijal (eV)
Kisik (atom)	13,6
Kisik (molekula)	12,06
Dušikov monoksid	14,5
Ugljikov dioksid	13,77
Helij	24,58
Argon	15,75



Slika 16. Toplinska vodljivost pojedinog zaštitnog plina u ovisnosti o temperaturi [12]

4.2. PLINSKE MJEŠAVINE

U proteklih 60 godina stvoreno je mnogo plinskih mješavina kojima je osnova inertni argon, te dodatci ostalih komponenti (ponekad i više od dvije). Međutim analiza utjecaja zaštitnih plinova uvijek se svodi na operativno tehnološke značajke, ali je prijeko potrebno naglasiti da izbor zaštitnih plinova utječe i na intenzitet emisije za zdravlje opasnih para, plinova i čestica. Najčešće se spominju ozon (O_3) i šesterovalentni krom (Cr^{6+}) kod zavarivanja visokolegiranih i nehrđajućih čelika. Prije 25 godina problem ozona potaknuo je razvoj i komercijalizaciju nove vrste zaštitnih plinova kojima se dodaje dušikov oksid (NO). Dušikov oksid je nova komponenta zaštitnih plinova i dodaje se u malim udjelima, značajno nižim od 1% te bitno utječe na proces zavarivanja, posebno visokolegiranih nehrđajućih čelika. [12]

Izborom sastava zaštitne plinske mješavine, moguće je u potrebnom omjeru kombinirati svojstva pojedinih sastavnih dijelova tako da rezultirajuća mješavina ima optimalna svojstva za zadane uvjete. Na primjer mješavinom argona i ugljičnog dioksida u pogodnom omjeru postizemo željeni oblik penetracije. Treba napomenuti da kod izbora mješavine treba uzeti u obzir ne samo jedan kriterij, na primjer penetraciju, već se mogu pojaviti i drugi utjecaji: izgled zavora, sklonost pojedinom tipu grešaka, itd. Na potrebnu količinu plina utječe i sastav zaštitne atmosfere tj. mješavine. Veći udio gušćeg plina u mješavini osigurava njenu veću krutost, odnosno otpornost na poprečna strujanja zraka. Daljnje uštede mogu se postići primjenom zaštitnih mješavina time što se mogu postići veći zaštitni učinci, tj. kraće vrijeme zavarivanja, te manji troškovi dodatnog materijala zbog manjeg rasprskivanja [3].

Kod klasičnog MAG zavarivanja kao zaštitni plin koristi se CO_2 ili mješavina plinova (MAGM zavarivanje). Mješavine plinova se koriste sa svrhom da se poboljša način prijenosa metala i svojstva zavarenih spojeva. Primjena MAGM impulsnog zavarivanja za zavarivanje svih vrsta čelika ima niz prednosti pred klasičnim zavarivanjem: [3]

- Primjenom mješavina plinova i impulsne struje za zavarivanje postiže se povoljniji prijenos metala, bez kratkih spojeva, fizički izgled zavora je jednolik i gladak, a i kemijsko metalurški sastav zavora je ujednačeniji;
- Uslijed smanjenog štrcanja manji su gubici materijala i nije potrebno čišćenje površine radnog komada od naštrcanih kapljica čime se postiže značajno smanjenje troškova. Pri automatskim i robotiziranim zavarivanjima izbjegnuto je onečišćenje sapnice i smanjuje se broj čišćenja;

- Deformacije uslijed zavarivanja su manje radi manjeg unosa topline, što je naročito važno pri zavarivanju tankih limova, jer je smanjena potreba za ravnanjem;
- Zavarivanje je moguće izvoditi uz manje struje uz primjenu žica većih promjera, čime se može utjecati na smanjenje grešaka u zavaru, na primjer manja količina unesenog vodika;
- Smanjuje se neophodni asortiman žica dodatnih materijala obzirom na promjer, jer se regulacijom parametara istom žicom uspješno zavaruju materijali različitih debljina;
- Moguće je ostvariti slobodan let kapljica i u prisilnim položajima zavarivanja te izbjeći neke nedostatke zavarivanja kratkim spojevima;
- Razvoj strojeva usmjeren je prema sve većoj primjeni tranzistorskih izvora struje, čime se olakšava izbor parametara zavarivanja;
- Poboljšana je i olakšana kontrola parametara zavarivanja te odabiranje optimalnih parametara zavarivanja razvojem „synergic“ MIG/MAGM zavarivanja;
- Razvojem „synergic“ MIG/MAGM zavarivanja može se na osnovi jedne zadane vrijednosti pojedinog parametra na primjer samo brzine dodavanja žice, odrediti ostale potrebne parametre pomoću programa ugrađenog u stroj.

Najčešće dvokomponentne mješavine sadrže argon i kisik ili argon i ugljikov dioksid. To su mješavine koje su podobne za zavarivanje konvencionalnim, ali i impulsnim načinom prijenosa dodatnog materijala. [11]

4.2.1. TROKOMPONENTNE PLINSKE MJEŠAVINE

Većinu trokomponentnih plinskih mješavina moguće je koristiti za sve konvencionalne, kao i impulsni način prijenosa metala. Korištenjem mješavina koje sadrže argon i 15% do 35% helija i 1% do 2% ugljikovog dioksida moguće je postići i do 20% veće brzine zavarivanja, manje deformacije kod tanjih materijala, te bolji utjecaj na profil zavara spram većine dvokomponentnih plinskih mješavina [11]. Trokomponentne plinske mješavine primjenjuju se pri zavarivanju ugljičnih i nehrđajućih čelika, te u nekim slučajevima legura nikla. Za prijenos materijala kratkim spojevima pri zavarivanju ugljičnog čelika, dodatak od 40% helija u mješavinu argona i CO₂ dovodi do šireg profila zavara. Helij omogućuje veću toplinsku vodljivost za prijenos materijala kratkim spojevima pri zavarivanju ugljičnih i nehrđajućih čelika. Primjena ovih mješavina je česta kod zavarivanja nehrđajućih čelika. Kod korozijski postojanih čelika, primjena trokomponentnih mješavina je svakodnevna pojava. Udjeli helija od 55 do 90% i 2,5% CO₂ dodaju se argonu za prijenos materijala kratkim spojevima. [13]

Prednosti ovih mješavina su: [13]

- smanjeno štrcanje,
- poboljšana viskoznost taline,
- ravni i položeniji izgled zavara,
- stabilniji električni luk.

Argon s udjelom od 5 – 10% CO₂ i sa 1 – 6% O₂ uglavnom služi za zavarivanje ugljičnih, niskolegiranih čelika različitih debljina. Ove plinske mješavine primjenjuju se kada se traže dobra mehanička svojstva zavarenih spojeva spomenutih vrsta osnovnog materijala. Na tankostijenim radnim komadima, udio kisika poboljšava stabilnost luka i smanjuje potrebnu jakost struje, što omogućuje kratki i lako upravljivi električni luk i doprinosi smanjenju prekomjernog protaljivanja i izobličenja zbog smanjenog unosa topline u području zavara. Trokomponentne Ar - CO₂ - O₂ mješavine podržavaju prijenose materijala kratkim spojevima, štrcajućim lukom te impulsnim strujama za primjene na legiranim i niskolegiranim čelicima. [14]

Tablicom 2 dan je prikaz trokomponentnih plinskih mješavina Ar - O₂ - CO₂ koje se koriste pri MAG zavarivanju.

Tablica 2. Tablica trokomponentnih zaštitnih plinskih mješavina Ar - O₂ - CO₂ [13]

Naziv proizvoda	Grupa po HRN EN ISO 14175	Volumni udio %			Postupak prema HRN EN 14610	Primjena
		Ar	O ₂	CO ₂		
Inoxline C3 X1	M14	96	1	3	MAGM	Visokolegirani čelici i čelici na bazi Ni
Ferroline C5 X5	M23	90	5	5	MAGM	Nelegirani i niskolegirani čelici
Ferroline C6 X1	M24	93	1	6	MAGM	Nelegirani i niskolegirani čelici
Ferroline C12 X12	M24	86	2	12	MAGM	Nelegirani i niskolegirani čelici

5. EKSPERIMENTALNI DIO RADA

5.1. UVOD

Zadatak eksperimentalnog dijela ovog rada bio je osmisлити plan pokusa i izvesti eksperiment u laboratoriju, kojim bi se mogle usporediti karakteristike električnog luka u konvencionalnom i CBT načinu prijenosa metala u zaštiti trokomponentnih plinskih mješavina sastava 90% Ar, 5% O₂ i 5% CO₂ te 93% Ar, 1% O₂ i 6% CO₂ na više razina unosa topline. Analizirati dobivene rezultate i posebno komentirati područje prijelaznog luka. Odabran je proces navarivanja konstrukcijskog čelika (S 235) zbog toga što se zadane mješavine koriste za zavarivanje nelegiranih i niskolegiranih čelika. Razine unosa topline kontrolirane su pomoću varijabilnih utjecajnih parametara zavarivanja na količinu unesene topline, struje zavarivanja, napona i brzine zavarivanja. Eksperiment se provodio na tri različite razine unosa topline. Na svakoj se razini unosa topline navarivalo u zaštitnoj atmosferi jedne i druge plinske mješavine, prvo konvencionalnim načinom prijenosa metala, a zatim CBT (DC low spatter) načinom prijenosa metala u električnom luku. Praćene su karakteristike električnog luka tijekom navarivanja, a nakon navarivanja sam izgled površine dobivenog navara i površine radnog komada u okolini navara, nakon čega je uslijedila usporedba i analiza tih rezultata. Korišteni izvor struje za zavarivanje je Daihen Varstroj Welbee P500L, koji je opremljen mikroprocesorom koji omogućuje CBT prijenos metala u električnom luku.

5.2. IZVOR STRUJE ZA ZAVARIVANJE

Korišteni izvor struje za zavarivanje WB – P500L kojeg je razvila i proizvela tvrtka Daihen Varstroj predstavlja najnoviju generaciju izvora struje za MAG zavarivanje. Prvi je izvor struje za zavarivanje upravljan Welbee mikroprocesorom koji između ostalih omogućava i „low spatter“ mod, tj. CBT način rada. Inverterski izvori struje za zavarivanje s Welbee mikroprocesorom nude niz prednosti u ručnom i robotiziranom zavarivanju, pa tako i mogućnost zavarivanja inovativnim CBT procesom. Značajno smanjuje količinu štrcanja širom intervala niske do visoke struje zavarivanja pomoću precizno optimiziranog valnog oblika impulsne struje za zavarivanje. Daihen Varstroj WB – P500L prikazan je na slici 17.



Slika 17. Izvor struje za zavarivanje WB - P500L [15]

Slikom 18 prikazano je korisničko sučelje uređaja WB – P500L pomoću kojeg se podešavaju parametri zavarivanja. Prije početka zavarivanja potrebno je podesiti parametre zavarivanja prema zahtijevanom unosu topline, dodatnom materijalu, sastavu zaštitnog plina, i željenom načinu prijenosa metala u el. luku. Za dodatni materijal potrebno je podesiti kvalitetu materijala (mild steel) i promjer žice za zavarivanje (1,2 mm). Uređaj omogućuje generiranje sinergijskih strujnih krivulja za neke plinske mješavine. S obzirom da korištene mješavine nisu ponuđene, odabrana je sinergijska strujna krivulja za rad s mješavinom plinskog sastava najbližeg sastavu korištenih mješavina, konkretno - MAG (10% CO₂). Potrebno je podesiti još i jakost struje zavarivanja. Mijenjanjem jakosti struje zavarivanja određena je razina unosa topline. Za svaku zadanu jakost struje uređaj je automatski ponudio preporučeni napon zavarivanja sukladno preostalim zadanim parametrima zavarivanja. Brzina navarivanja podešena je na posebnom uređaju za vođenje pištolja „BUG – O MDS 1002“, spomenuto u tekstu kasnije.



Slika 18. Korisničko sučelje uređaja za zavarivanje WB – 500L

5.3. DODATNI MATERIJAL

U eksperimentalnom radu korišteni dodatni materijal je puna elektrodna žica promjera 1,2 mm, proizvođača Elektroda Zagreb d.d. trgovačkog imena EZ - SG 2. Karakteristike korištenog dodatnog materijala dane su na slici 19.

EZ - SG 2

NORME

HRN EN ISO 14341-A	AWS / ASME SFA-5.18	DIN 8559	W. Nr.
G 42 4 C/M 3Si1	ER70S-6	SG 2	1.5125

SVOJSTVA I PODRUČJE PRIMJENE

Pobakrena ili pobrončana žica za zavarivanje u zaštitnoj atmosferi plina CO₂ ili mješavine plinova Ar/CO₂. Za zavarivanje nelegiranih i niskolegiranih čelika čvrstoće do 590 N/mm².

Grupa čelika	HRN (stari)	DIN (W. Nr.)	HRN / EN / ISO
Konstrukcijski čelici	Č 0261 do Č 0545	St 33 (1.0035) do St 52-2N (1.0050)	S 185 do E 295 Fe 310-0 do Fe 490-2
Kotlovski čelici	Č 1202 Č 1204 Č 3133 Č 3105	HI (1.0345) HII (1.0425) 17Mn4 (1.0481) 19Mn6 (1.0473)	P235GH P265GH P295GH P355GH
Čelici za cijevi	Č 1212 do Č 3100	St 35.4 (1.0309) do St 52.4 (1.0581) StE 210.7 (1.0307) do StE 360.7 (1.0582)	DX55D do P355T2 L210 do L360NB
Brodski čelici	A, B, D, E AH 32 do EH 36	A, B, D, E AH 32 do EH 36	
Sitnozrnati čelici	ČRO 250 do ČRO 350 ČRV 250 do ČRV 350	StE 285 (1.0486) StE 355 (1.0562) WStE 285 (1.0487) WStE 355 (1.0565)	P275N P355N P275NH P355NH
Čelični ljev	ČL 0300 do ČL 0500	GS-38 (1.0416) do GS-52 (1.0551)	C18D do S355JRC

MEHANIČKA SVOJSTVA ČISTOG METALA ZAVARA

R _{eL} N/mm ²	R _m N/mm ²	A ₅ %	KV (-40°C) J
> 430	500 - 640	> 22	≥ 47

ORIJENTACIJSKI KEMIJSKI SASTAV ŽICE

C	Mn	Si	Cu
% 0,06 - 0,13	1,4 - 1,6	0,7 - 1,0	≤ 0,3

ZAŠTITNI PLIN

C1 ili M21

PAKIRANJE

Promjer žice mm	Namotaj
0,6; 0,8; 1,0; 1,2; 1,6	Slobodan (S-L); žica do žice (S-S)

1 kg - plastični kolut (promjer žice 0,6 i 0,8 mm)
5 kg - plastični kolut (promjer žice 0,6 i 0,8 mm)
15 kg - plastični (S-L ili S-S) ili žičani kolut (S-S) (promjer žice 0,8; 1,0; 1,2 i 1,6 mm)
250 kg - bačva (promjer žice 0,8; 1,0 i 1,2 mm)

ODOBRENJA

ABS (3YSA); BV (SA 3Y M); CRS (3YS); DB; DNV (IIIIYS); GL (3YS); LR (3S,3YS); RINA (3YS); TÜV

= +

Slika 19. Dodatni materijal korišten pri izradi eksperimenta [16]

5.4. ZAŠTITNE PLINSKE MJEŠAVINE

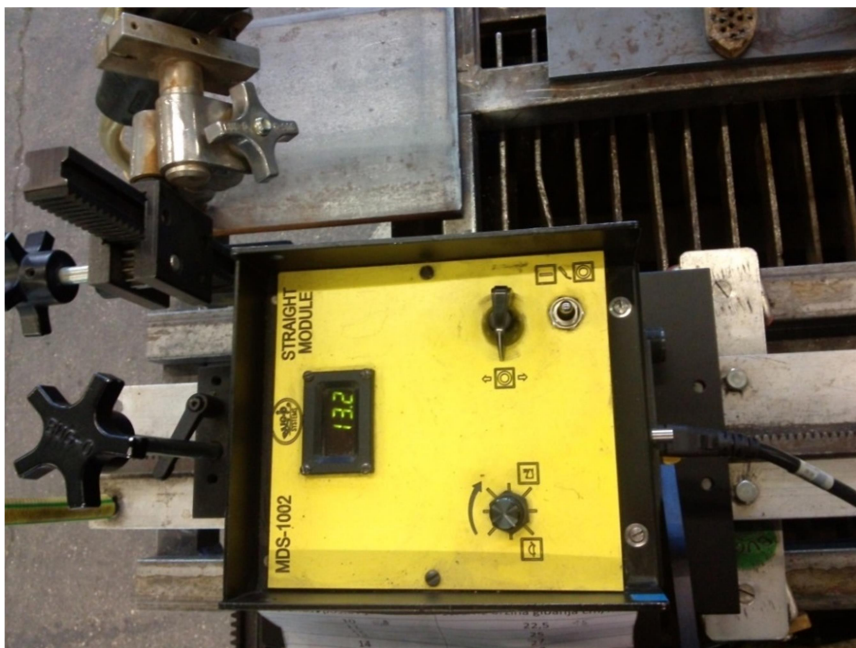
U zadatku je bilo potrebno usporediti karakteristike električnog luka u zaštiti dvaju različitih trokomponentnih plinskih mješavina, odnosno utjecaj zadanih plinskih mješavina na prijenos metala i izgled zavara. Zadane su plinske mješavine 90% Ar, 5% O₂, 5% CO₂ i 93% Ar, 1% O₂, 6% CO₂, a korišteni su zaštitni plinovi proizvođača Messer pod nazivima Ferroline C5 X5 i Ferroline C6 X1. Prema normi *HRN EN ISO 14175:2008* Dodatni i potrošni materijali za zavarivanje - plinovi i plinske mješavine za zavarivanje i srodne postupke imaju oznaku M 23 odnosno M24. Ferroline C5 X5 i Ferroline C6 X1 plinske mješavine namijenjene su zavarivanju nelegiranih i niskolegiranih čelika. Prema normi *HRN EN ISO 14175* plinske su mješavine prikazane u tablici 3.

Tablica 3. Korišteni zaštitni plinovi [13]

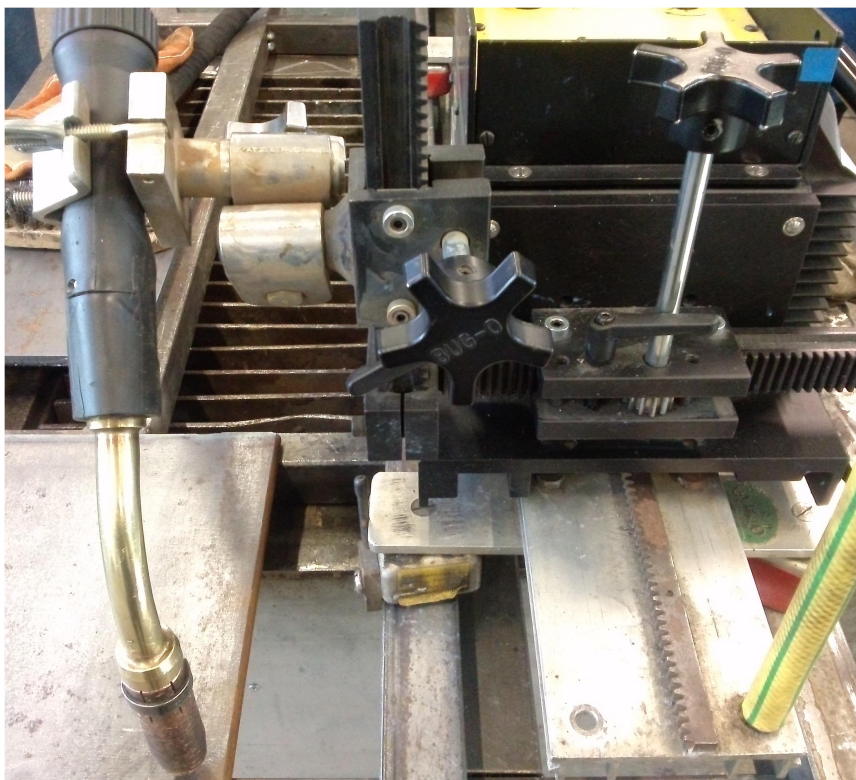
Naziv proizvoda	Grupa po HRN EN ISO 14175	Volumni udio %			Postupak prema HRN EN 14610	Primjena
		Ar	O ₂	CO ₂		
Ferroline C5 X5	M23	90	5	5	MAGM	Nelegirani i niskolegirani čelici
Ferroline C6 X1	M24	93	1	6	MAGM	Nelegirani i niskolegirani čelici

5.5. AUTOMAT ZA VOĐENJE PIŠTOLJA

U eksperimentu je korišten automat za vođenje pištolja „BUG – O MDS 1002“, koji omogućava konstantnu brzinu vođenja pištolja i konstantno odstojanje slobodnog kraja žice. Podešena je brzina zavarivanja 30 cm/min, duljina slobodnog kraja žice od 15 mm i neutralna tehnika rada. Uređaj je prikazan na slici 20 a) i b).



Slika 20. a) Uređaj za vođenje pištolja „BUG – O MDS 1002“



Slika 20. b) Uređaj za vođenje pištolja „BUG – O MDS 1002“

5.6. PROCESI NAVARIVANJA

Eksperiment je izveden u Laboratoriju za zavarivanje Fakulteta strojarstva i brodogradnje. Prethodnim ispitivanjem utvrđeno je da je na višim jakostima struje od 200 A prisutno izrazito štrcanje i visoka nestabilnost električnog luka, te je iz tog razloga za gornju granicu odabrana jakost struje od 200 A.

Svaki je navar označen dvoslovnim oznakom i brojem. Prvo slovo označava zaštitni plin, oznaka „B“ označava plin Ferrolin C6 X1, a oznaka „A“ označava plin Ferrolin C5 X5. Drugo slovo označava način prijenosa metala u električnom luku, slovo „K“ – konvencionalno zavarivanje, „C“ – CBT zavarivanje. Broj „1“ označava struju zavarivanja 150 A, broj „2“ označava struju zavarivanja 175 A, a broj „3“ označava struju zavarivanja 200 A. Na slikama je svaki navar označen pripadajućom oznakom. Unos topline računat je prema izrazu za unos topline pri zavarivanju:

$$Q = \frac{U \cdot I \cdot \eta}{v_z} \text{ [kJ/cm]},$$

Gdje je:

Q – unesena topline

U – napon zavarivanja, V

I – jakost struje zavarivanja, A

v_z – brzina zavarivanja, cm/s

η – stupanj iskorištenja postupka zavarivanja ($MAG = 0,8$).

S obzirom na to da su parametri zavarivanja (struja i napon) tijekom zavarivanja malo odstupali od zadane vrijednosti, unos topline računat je pomoću tih vrijednosti.

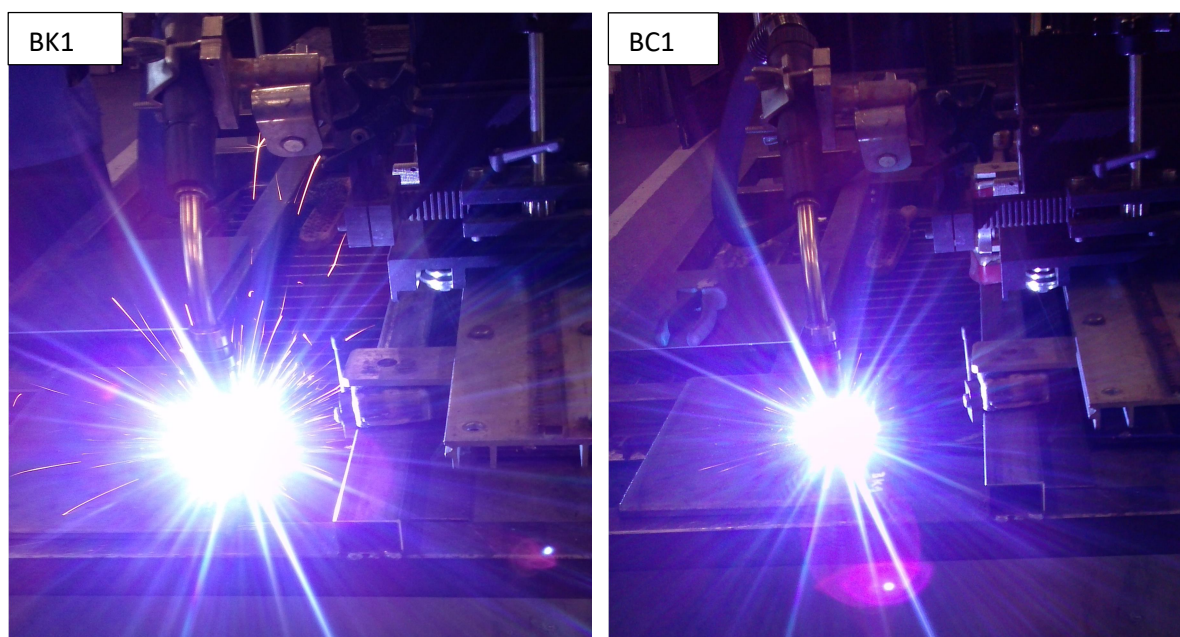
5.6.1. NAVARIVANJE U ZAŠTITI PLINA Ferroline C6 X1

Prvo je proveden proces navarivanja u zaštiti plina Ferroline C6 X1 na čeličnoj ploči 250 x 200 x 10 mm, od čelika S235 pri jakostima struja 150, 175 i 200 A, za svaku struju konvencionalnim i CBT načinom prijenosa metala. Brzina zavarivanja je iznosila 30 cm/min (konstantna), a protok plina 17 l/min (konstantan). Za proces navarivanja u plinskoj mješavini Ferroline C6 X1, parametri zavarivanja dani su u tablici 4, u kojoj oznaka „K“ označava konvencionalan prijenos metala u električnom luku, a oznaka „C“ CBT prijenos metala u električnom luku.

Tablica 4. Parametri zavarivanja pri navarivanju u zaštiti plinske mješavine Ferroline C6 X1

OZNAKA NAVARA	BK1	BC1	BK2	BC2	BK3	BC3
JAKOST STRUJE [A]	150	150	175	175	200	200
NAPON [V]	16	16	17	17	18	18
NAČIN PRIJENOSA METALA K/C	K	C	K	C	K	C
JAKOST STRUJE U TOKU ZAVARIVANJA [A]	141	145	172	175	205	203
NAPON U TOKU ZAVARIVANJA [V]	16,2	16,1	16,5	16,5	17,5	18,1
BRZINA ZAVARIVANJA [cm/min]	30	30	30	30	30	30
UNOS TOPLINE [kJ/cm]	3,655	3,735	4,541	4,620	5,740	5,879

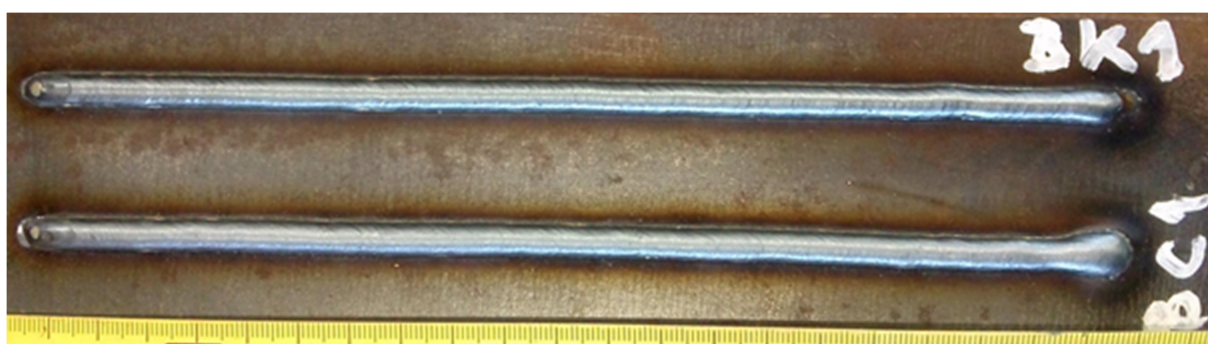
Na slikama 21, 23 i 25 dan je usporedni prikaz električnog luka tijekom navarivanja u zaštiti plinske mješavine Ferroline C6 X1 pri strujama zavarivanja redom 150, 175 i 200 A, konvencionalno i CBT metodom.



a) Konvencionalno

b) CBT

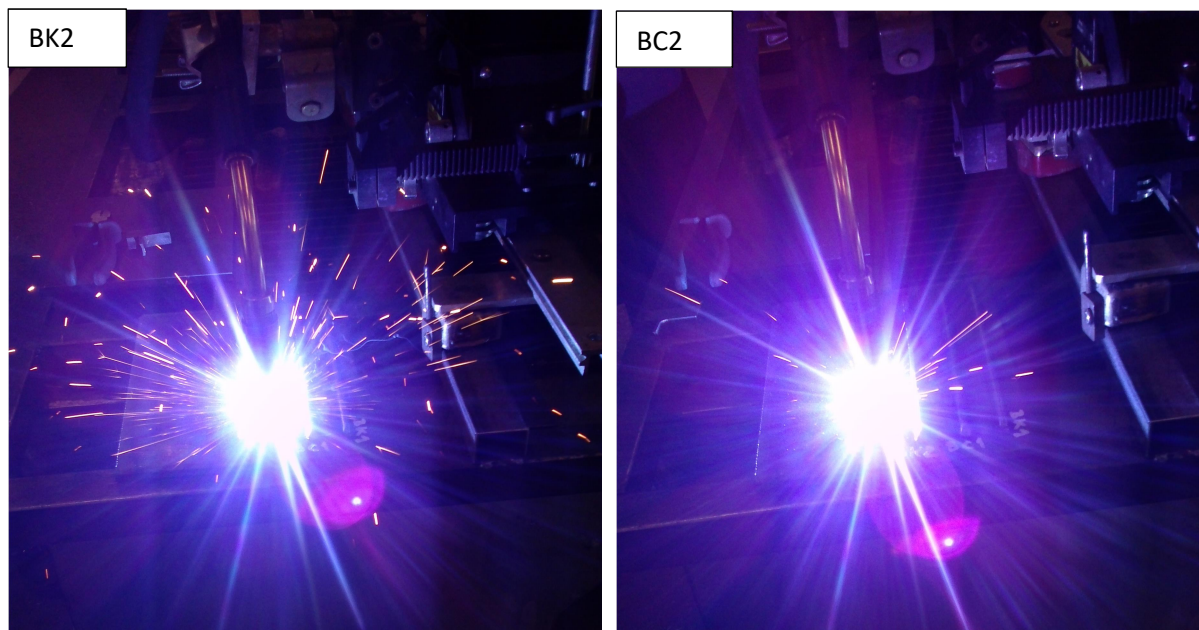
Slika 21. Usporedni prikaz električnog luka pri navarivanju u zaštiti Ferroline C6 X1 i jakosti struje zavarivanja 150 A



Slika 22. Izgled navara, konvencionalno i CBT (150 A, Ferroline C6 X1)

Pri navarivanju u zaštiti plinske mješavine Ferroline C6 X1 i jakosti struje zavarivanja od 150 A, na slici 21 jasno je vidljivo da prilikom konvencionalnog prijenosa metala u električnom luku izraženije štrcanje u odnosu na štrcanje prilikom CBT prijenosa metala, gdje je štrcanje gotovo izostalo. Nadalje na slici 22 usporedbom navara vidljivo je da je kod CBT zavarivanja površina navara ravnomjernija, navar je širi, a posljedice štrcanja su izostale. U tablici 1 dane su vrijednosti jakosti struje i napona tijekom navarivanja. Prosječne vrijednosti jakosti struje i napona u toku navarivanja bili su:

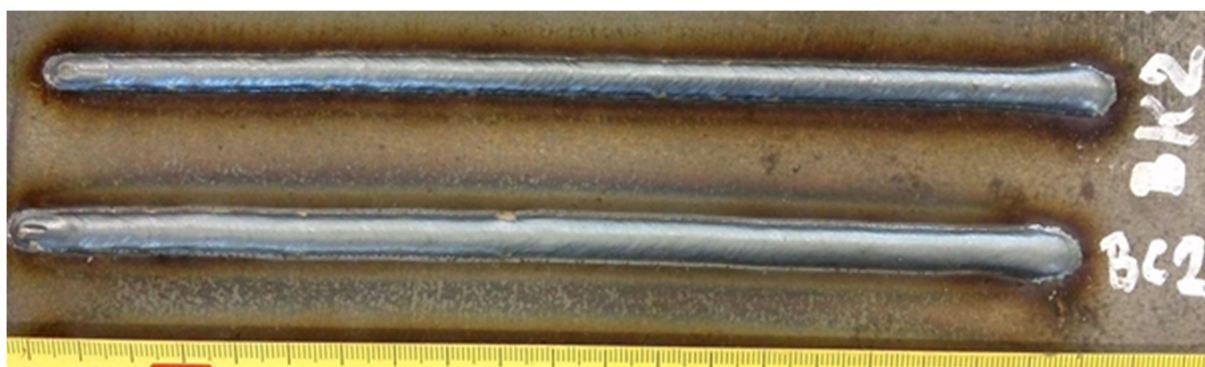
- konvencionalno: 141 A, 16,2 V,
- CBT: 145 A, 16,1 V.



a) Konvencionalno

b) CBT

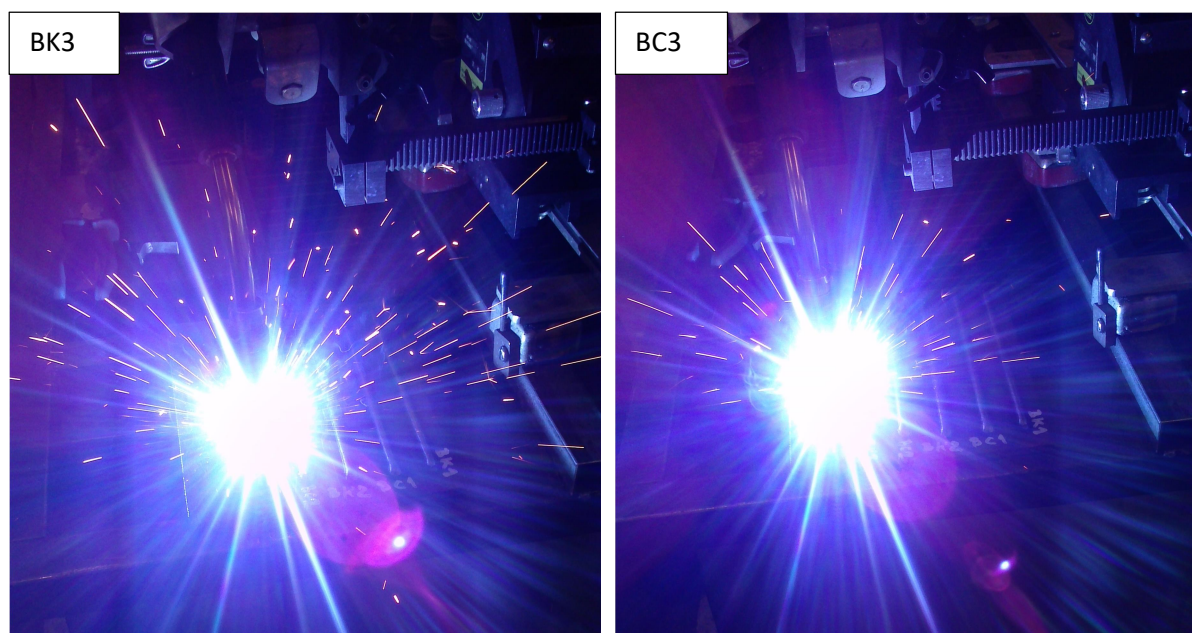
Slika 23. Usporedni prikaz električnog luka pri navarivanju u zaštiti Ferroline C6 X1 i jakosti struje zavarivanja 175 A



Slika 24. Izgled navara, konvencionalno i CBT (175 A, Ferroline C6 X1)

Navarivanjem pri jakosti struje od 175 A, izraženija je pojava štrcanja u odnosu na navarivanje pri jakosti struje od 150 A. Na slici 23 i dalje je jasno vidljivo smanjenje štrcanja pri CBT zavarivanju. Usporedbom izgleda navara vidljiva je bolja kvaliteta površine navara i nešto širi navar pri CBT zavarivanju (slika 24). ZUT kod konvencionalnog zavarivanja tamniji je i zahvatio je nešto veću površinu okoline navara od ZUT – a kod CBT zavarivanja. Također su vidljivi češći oksidi uz rubove navara kod konvencionalnog zavarivanja u odnosu na CBT zavarivanje. I dalje izostaju posljedice štrcanja. Prosječne vrijednosti jakosti struje i naponi u toku navarivanja bili su:

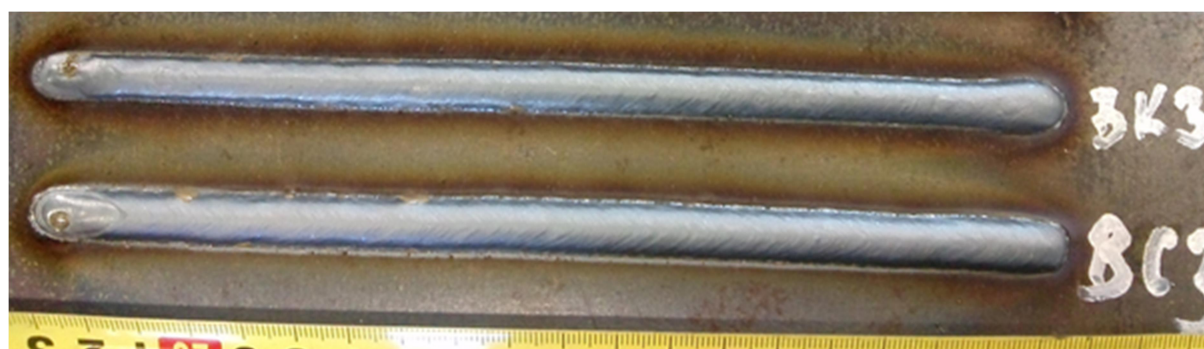
- konvencionalno: 172 A, 16,5 V,
- CBT: 175 A, 16,5 V.



a) Konvencionalno

b) CBT

Slika 25. Usporedni prikaz električnog luka pri navarivanju u zaštiti Ferroline C6 X1 i jakosti struje zavarivanja 200 A



Slika 26. Izgled navara, konvencionalno i CBT (200 A, Ferroline C6 X1)

Prilikom navarivanja uz jakost struje od 200 A, ušli smo u područje prijenosa metala prijelaznim lukom, što je vidljivo na slici 25. I kod konvencionalnog i kod CBT navarivanja zamjećuje se pojava štrcanja, koja je i dalje značajno smanjena korištenjem CBT načina prijenosa metala. Kod ove jakosti struje štrcanje je očekivano najizraženije. Kod CBT zavarivanja navar zadržava bolju kvalitetu površine i veću širinu. Zona ZUT – a kod navarivanja konvencionalnim načinom prijenosa metala tamnija je i zahvaća veću površinu okoline navara. Oksidi su vidljivi na oba navara. Posljedice štrcanja na površini osnovnog metala i dalje nisu zamjećene unatoč prisutnom jakom štrcanju. Prosječne vrijednosti jakosti struje i naponi u toku navarivanja bili su:

- konvencionalno: 139 A, 16,2 V,
- CBT: 149 A, 15,9 V.

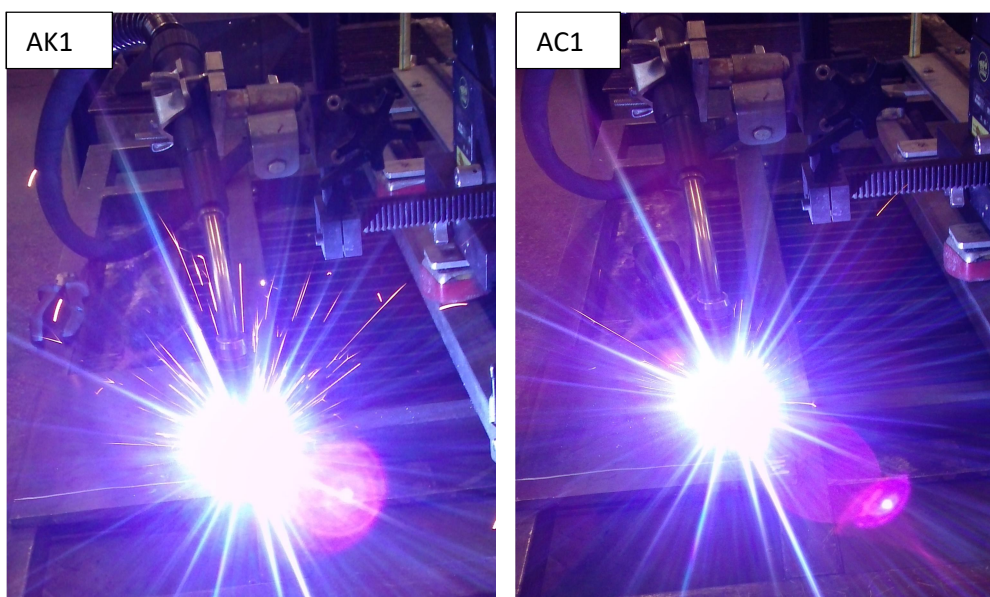
5.6.2. NAVARIVANJE U ZAŠTITI PLINA Ferroline C5 X5

Navarivanje u zaštiti plina Ferroline C5 X5 provedeno je na čeličnoj ploči 250 x 200 x 10 mm, od čelika S235 pri jakostima struja 150, 175 i 200 A, za svaku struju konvencionalnim i CBT načinom prijenosa metala. Brzina zavarivanja je iznosila 30 cm/min (konstantna), a protok plina 17 l/min (konstantan). Za proces navarivanja u plinskoj mješavini Ferroline C5 X5, parametri zavarivanja dani su u tablici 5, u kojoj oznaka „K“ označava konvencionalan prijenos metala u električnom luku, a oznaka „C“ CBT prijenos metala u električnom luku.

Tablica 5. Parametri zavarivanja pri navarivanju u zaštiti plinske mješavine Ferroline C5 X5

OZNAKA NAVARA	AK1	AC1	AK2	AC2	AK3	AC2
JAKOST STRUJE [A]	150	150	175	175	200	200
NAPON [V]	16	16	17	17	18	18
NAČIN PRIJENOSA METALA K/C	K	C	K	C	K	C
JAKOST STRUJE U TOKU ZAVARIVANJA [A]	139	149	168	173	196	205
NAPON U TOKU ZAVARIVANJA [V]	16,2	15,9	16,4	16,9	17,5	18,0
BRZINA ZAVARIVANJA [cm/min]	30	30	30	30	30	30
UNOS TOPLINE [kJ/cm]	3,603	3,791	4,408	4,678	5,488	5,904

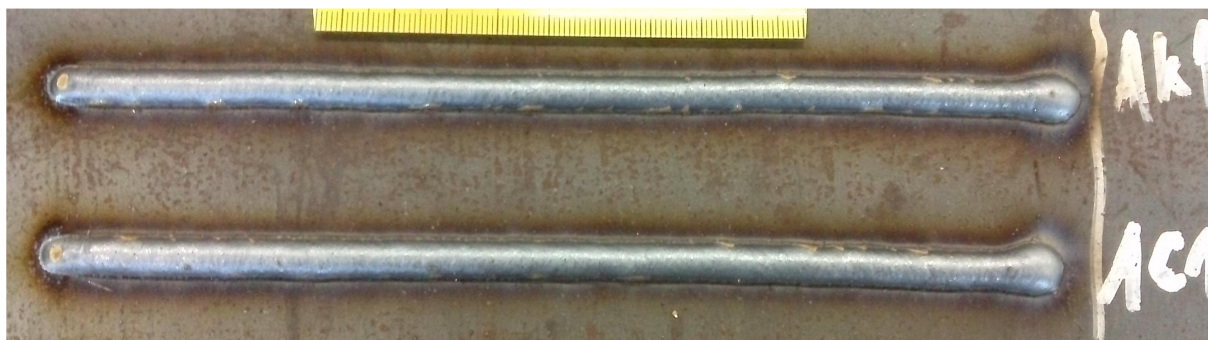
Na slikama 27, 29 i 31 dan je usporedni prikaz električnog luka tijekom navarivanja u zaštiti plinske mješavine Ferroline C5 X5 pri strujama zavarivanja redom 150, 175 i 200 A, konvencionalno i CBT metodom.



a) Konvencionalno

b) CBT

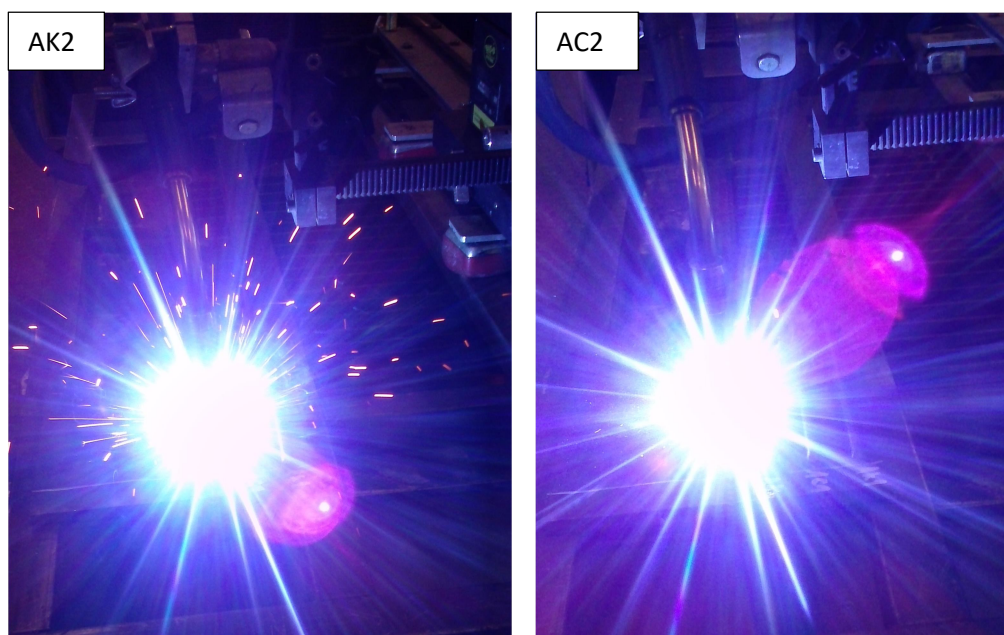
Slika 27. Usporedni prikaz električnog luka pri navarivanju u zaštiti Ferroline C5 X5 i jakosti struje zavarivanja 150 A



Slika 28. Izgled navara, konvencionalno i CBT (150 A, Ferroline C5 X5)

Pri navarivanju s jakosti struje od 150 A, prijenos metala odvijao se kratkim spojevima. Na slici 27 a) kod konvencionalnog zavarivanja vidljiva je pojava štrcanja, dok na slici b) pri CBT zavarivanju to štrcanje izostaje. Na slici 28 vidljivi su oksidi po rubovima navara, i nešto ravnomjernija površina navara u slučaju CBT zavarivanja. Posljedice štrcanja nisu zamjećene. Prosječne vrijednosti jakosti struje i naponi u toku navarivanja bili su:

- konvencionalno: 139 A, 16,2 V,
- CBT: 149 A, 15,9 V.



a) Konvencionalno

b) CBT

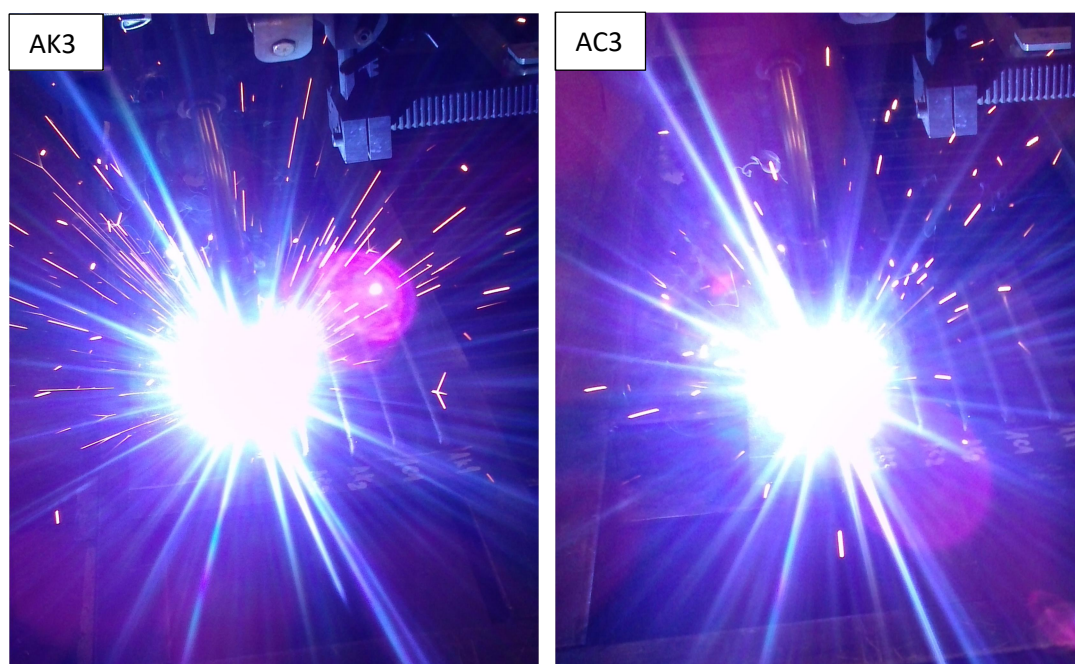
Slika 29. Usporedni prikaz električnog luka pri navarivanju u zaštiti Ferroline C5 X5 i jakosti struje zavarivanja 175 A



Slika 30. Izgled navara, konvencionalno i CBT (175 A, Ferroline C5 X5)

Na slici 29 primjećeno je očekivano izraženije štrcanje u odnosu na navarivanje pri jakosti struje od 150 A, ali pri CBT zavarivanju štrcanje izostaje. Vidljive su jako slabe posljedice štrcanja. Usporedbom navara (slika 30) moguće je uočiti da je kod CBT zavarivanja površina navara ravnomjernija, i zona ZUT – a šira je kod konvencionalnog zavarivanja. Površinski su oksidi prisutni na oba navara (slika 30). Prosječne vrijednosti jakosti struje i naponi u toku navarivanja bili su:

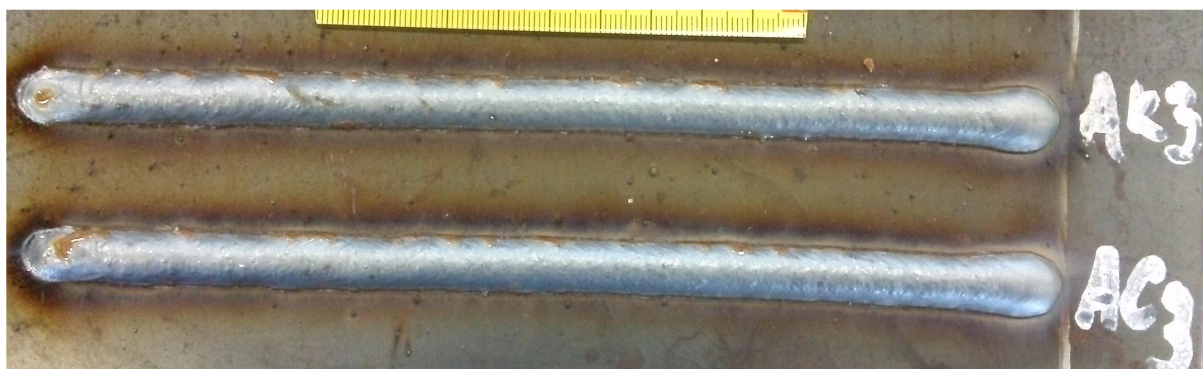
- konvencionalno: 168 A, 16,4 V,
- CBT: 173 A, 16,9 V.



a) Konvencionalno

b) CBT

Slika 31. Usporedni prikaz električnog luka pri navarivanju u zaštiti Ferroline C5 X5 i jakosti struje zavarivanja 200 A



Slika 32. Izgled navara, konvencionalno i CBT (200 A, Ferroline C5 X5)

Pri navarivanju s jakosti struje od 200 A ušli smo u područje prijenosa metala prijelaznim lukom, i štrcanje je očekivano poraslo (slika 31). CBT zavarivanjem štrcanje je smanjeno, ali ipak prisutno. CBT zavarivanjem postignut je ravnomjerniji navar. Površinski su oksidi prisutni na oba navara, posljedice štrcanja također (slika 32). Prosječne vrijednosti jakosti struje i naponi u toku navarivanja bili su:

- konvencionalno: 196 A, 17,5 V,
- CBT: 205 A, 18,0 V.

5.7. ANALIZA REZULTATA

Prilikom CBT zavarivanja u zaštiti obje mješavine štrcanje je gotovo u potpunosti izostalo kod prijenosa metala kratkim spojevima (150, 175 A), dok je području prijelaznog luka štrcanje značajno smanjeno u usporedbi s konvencionalnim zavarivanjem. Prilikom rada u laboratoriju sam proces navarivanja bio je stabilniji pod zaštitom plinske mješavine C6 X1 u odnosu na proces navarivanja pod zaštitom plinske mješavine Ferroline C5 X5. Na priloženim slikama navara (slike 22 do 32) to se očituje u posljedicama štrcanja na površinama radnih komada. Na radnom komadu na kojem je provedeno navarivanje u zaštiti plinske mješavine Ferroline C6 X1 posljedice štrcanja su izostale čak i u području prijelaznog luka (200 A), dok su na radnom komadu navarivanom u zaštiti plinske mješavine Ferroline C5 X5 posljedice štrcanja vidljive već pri jakosti struje od 175 A. Na svim navarima vidljiva je pojava površinskih oksida. U zaštiti plinske mješavine Ferroline C5 X5 očitovana je nešto veća količina površinskih oksida prisutnih uglavnom po rubovima navara.

Odstupanja parametara zavarivanja - jakost struje i napon. Uglavnom je riječ o padu jakosti struje u vrijednostima do 11 A, osim u slučaju CBT zavarivanja pri jakosti struje od 200 A gdje je struja porasla za 5 A pod zaštitom plinske mješavine Ferroline C5 X5 odnosno za 3 A pod zaštitom plinske mješavine C6 X1. Odstupanja napona su unutar vrijednosti $\pm 0,5$ V, što je bilo za očekivati obzirom na automatizirano zavarivanje s konstantnom kontrolom slobodnog kraja žice. Kako nema velikih oscilacija jakosti struje i napona i razine unosa topline poprimaju vrlo slične vrijednosti za zavarivanja pod zaštitom oba plina, razlike su unutar vrijednosti 0,2 kJ/cm. Kod konvencionalnog zavarivanja količina unesene topline veća je pod zaštitom plinske mješavine Ferroline C6 X1, dok je kod CBT zavarivanja veća količina unesene topline pod zaštitom plinske mješavine C5 X5 za sve jakosti struje zavarivanja. U svim je slučajevima količina unesene topline veća pri CBT zavarivanju.

Usporedno je stabilnost luka bila bolja u zaštiti plinske mješavine C6 X1, što može biti rezultat rada odabranom sinergijskom strujnom krivuljom MAG (10% CO₂). Zavarivanje u zaštiti plinske mješavine C6 X1 i odabranom sinergijskom strujnom krivuljom stabilno je, ali u zaštiti plinske mješavine Ferroline C5 X5 primjetan je nepravilan rad, eventualno poboljšanje može se postići korištenjem druge sinergijske strujne krivulje.

Plinska mješavina C6 X1 je pogodna za MAG CBT zavarivanje kratkim spojevima, čak i u području prijelaznog luka nema primjetnih posljedica štrcanja, iako je štrcanje prisutno. Za plinsku mješavinu C5 X5 potrebno je provesti dodatna ispitivanja da bi se mogla ocijeniti

pogodnost za korištenje pri MAG CBT zavarivanju. U ovom se eksperimentu pokazala pogodnom u području kratkih spojeva (150 i 175 A), dok je u području prijelaznog luka rezultirala većom količinom štrcanja i nestabilnijim procesom.

6. ZAKLJUČAK

MAG postupak zavarivanja nelegiranih čelika svake godine pronalazi sve širu primjenu u svim naprednim industrijama u svijetu. Uvjeti koji stavljaju ovaj postupak sve više u prvi plan su: ekonomičnost, široka mogućnost primjene, dobra mehanička svojstva zavarenog spoja, prikladnost za povećanje stupnja mehanizacije. Pojava velikog broja modificiranih postupaka MAG zavarivanja omogućuje vrlo visoke razine eksploatacijskih karakteristika kao i eliminaciju problema poput štrcanja. CBT - Controlled Bridge Transfer jedna je od novih inačica MAG zavarivanja koja predstavlja iskorak u razvoju ovog postupka zavarivanja. CBT je postupak zavarivanja koji kombinacijom zavarivanja kratkim spojevima i valnog oblika impulsne struje zavarivanja ostvaruje iznimno nisko štrcanje, omogućuje zavarivanje tankih limova uz veću količinu depozita, i manju opasnost od pojave protaljivanja zbog niske razine unosa topline. Također smanjuje potrebu za naknadnom obradom zavarenog spoja, pa tako i pojeftinjuje konstrukciju. Najčešću primjenu pronalazi u automobilske industriji.

Izborom sastava zaštitne plinske mješavine, moguće je u potrebnom omjeru kombinirati svojstva pojedinih sastavnih plinova tako da rezultirajuća mješavina ima optimalna svojstva za zadane radne uvjete. Mješavine plinova koriste se sa svrhom poboljšanja načina prijenosa dodatnog materijala i svojstva zavarenih spojeva. Trokomponentne plinske mješavine najčešće se primjenjuju pri zavarivanju ugljičnih i nehrđajućih čelika, te u nekim slučajevima legura nikla. Trokomponentne Ar - CO₂ - O₂ plinske mješavine podržavaju prijenose materijala kratkim spojevima, štrcajućim lukom te impulsnim strujama za primjene na legiranim i niskolegiranim čelicima. Zavarivanje trokomponentnim plinskim mješavinama zadržava mnoge prednosti u pogledu uspostavljanja i stabilnosti el. luka, kvalitete izvedbe zavarenih spojeva, količine nataljenog depozita i smanjenja potrebe za dodatnim čišćenjem ispred zavarivanja dvokomponentnim plinskim mješavinama, ili zavarivanja samo jednim plinom.

Ferroline C6 X1 plinska mješavina u ovom se eksperimentu pokazala boljom, u pogledu vizualnog izgleda površine zavara i stabilnosti samog procesa zavarivanja. Količina površinskih oksida je minimalna zbog niskog udjela kisika, a razina unosa topline veća je kod CBT zavarivanja i navar je širi.

Ferroline C5 X5 plinska mješavina u ovom se eksperimentu pokazala lošijom. Količina površinskih oksida je nešto veća zbog visokog oksidacijskog potencijala ove mješavine. Razina unosa topline veća je kod CBT zavarivanja.

POPIS LITERATURE:

- [1] Živčić, M.; Remenar, I.: Zavarivanje – Tehnološke podloge i unapređenje; Zagreb, 1972.
- [2] Garašić, I.; Kožuh, Z.; Remenar, M.: Analiza prijenosa metala pri MAG CBT zavarivanju; Zavarivanje vol. 57, str. 85 – 92, Zagreb, 2014.
- [3] Kralj, S.; Andrić, Š.: Osnove zavarivačkih i srodnih postupaka; Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 1992.
- [4] Lončar, D.: Priručnik za zavarivanje; Elektroda zagreb, Zagreb, 1987.
- [5] http://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/files/1398155789-0-mig_magzav1.ppt, dostupno 14.01.2017.
- [6] Lukačević, Z.: Zavarivanje; Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku - strojarski fakultet - Slavonski brod, Slavonski brod, 1998.
- [7] Garašić, I.; Jurica, M.; Kožuh, Z.: Usporedba konvencionalnog i CBT načina prijenosa metala u području prijelaznog luka, 8. International scientific professional conference sbz, 2015.
- [8] Era, T.; Ide, A.; Uezono, T.; Ueyama, T.; Hirata, Y.: Controlled bridge transfer (CBT) gas metal arc process for steel sheet joining, Welding international, 27:4, 268-273, 2013.
- [9] Era, T.; Ide, A.; Uezono, T.; Ueyama, T.: Spatter reduction of steel sheets welding using controlled bridge transfer (CBT) GMA process, IIW Doc. No. XII-1900-06, 2006.
- [10] Era, T.; Uezono, T.; Ueyama, T.; Yamamoto, H.: Developement of AC GMA welding system using controlled bridge transfer process, IIW Doc. No. XII – 1937 – 08
- [11] Garašić, I.; Jurica, M.; Požgaj, V.: Utjecaj zaštitnih plinova na oblik spoja pri MIG/MAG zavarivanju Cr – Ni čelika; ZAVARIVANJE – WELDING 2016 zbornik radova str. 213 – 215, Opatija, 2016.
- [12] Garašić, I.: Utjecaj dušikova oksida u zaštitnim plinovima na stvaranje ozona i šesterovalentnog kroma; Zavarivanje vol 56, 5/6, str. 181 – 183, Zagreb, 2013.

- [13] Dzelnitzki, D.: Prednosti visokoučinskog MAG zavarivanja; Zavarivanje vol 56, str. 36 – 41, Zagreb, 2012.
- [14] Levačić, L.: Trokomponentne plinske mješavine za MAG zavarivanje, Diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2015.
- [15] http://www.daihen-varstroj.si/welding-machines_ang/mig-mag-welding_ang/welbee-varilni-inverterji1_ang/welbee-p-500l-eng.html, dostupno 13. 02. 2017.
- [16] <http://www.elektroda-zagreb.hr/proizvodi/zice.html>, dostupno 13.02.2017.